

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«МОСКОВСКИЙ АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ  
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)»

---

На правах рукописи



**Старков Александр Владимирович**

**РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ УПРАВЛЕНИЯ ПОТОКАМИ ЦЕЛЕВОЙ  
ИНФОРМАЦИИ ПРИ ФУНКЦИОНИРОВАНИИ КОСМИЧЕСКОЙ  
СИСТЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ**

Специальность: 05.13.01

Системный анализ, управление и обработка информации  
(авиационная и ракетно-космическая техника)

Диссертация

на соискание ученой степени  
доктора технических наук

Научный консультант: Заслуженный деятель науки РФ,  
доктор технических наук,  
профессор В.В. Малышев

Москва, 2019

## Оглавление

Введение.....	6
Глава 1. Формализация задачи управления потоками целевой информации при функционировании космической системы ДЗЗ .....	17
1.1 Состояние и проблемы развития систем ДЗЗ.....	17
1.2 Основные объекты системы.....	27
1.2.1 Космические аппараты и их целевая аппаратура .....	28
1.2.2 Наземная космическая инфраструктура .....	35
1.2.3 Готовые информационные продукты .....	39
1.2.4 Потребители .....	53
1.2.5 Заявки .....	56
1.2.6 Циклограммы.....	63
1.2.7 Снимки и маршруты .....	66
1.3 Основные рабочие процессы .....	69
1.3.1 Сбор заявок.....	70
1.3.2 Планирование .....	71
1.3.3 Передача и прием циклограмм .....	74
1.3.4 Съёмка и хранение на борту КА.....	75
1.3.5 Передача и прием данных .....	76
1.3.6 Обработка снимков .....	77
1.3.7 Архивация и доставка тематического продукта.....	78
1.3.8 Процесс обслуживания единичной заявки.....	78
1.3.9 Объектная модель системы.....	83
1.4 Анализ и формирование показателей эффективности .....	85
1.5 Техническая постановка задачи управления распределением целевой информации по составным частям космической системы ДЗЗ .....	94
1.6 Выводы по главе 1.....	100
Глава 2. Методический подход к решению задачи оптимизации распределения потоков целевой информации при функционировании космической системы ДЗЗ.....	104
2.1 Математическая постановка задачи оптимизации .....	104
2.2 Общий подход к решению задачи .....	113
2.2.1 Методический подход к решению задачи оптимизации маршрута .....	113

2.2.2	Методический подход к формированию и использованию математических моделей рабочих процессов.....	115
2.3	Анализ условий применимости предлагаемого методического подхода	119
2.3.1	Условия применимости методического подхода к решению поставленной задачи.....	119
2.3.2	Условия применимости математических моделей и исходных данных.....	121
2.4	Математические модели функционирования составных частей космической системы ДЗЗ в задаче распределения целевой информации .....	121
2.5	Модель заявки потребителя .....	123
2.6	Выводы по главе 2.....	125
Глава 3.	Математические модели орбитальной группировки .....	128
3.1	Модель движения в задаче определения и прогнозирования состояния КА.....	129
3.1.1	Уравнения движения КА.....	129
3.1.2	Невозмущенное движение .....	131
3.1.3	Влияние нецентральности гравитационного поля Земли .....	131
3.1.4	Возмущения гравитационной природы от Луны и Солнца.....	133
3.1.5	Учет давления солнечного света .....	134
3.1.6	Вычисление ускорений от торможения атмосферой .....	136
3.1.7	Расчет координат Луны и Солнца .....	139
3.1.8	Модель вектора тяги .....	140
3.2	Модель проведения орбитальных коррекций КА ДЗЗ.....	144
3.2.1	Обеспечение изменения трассы путем проведения орбитальных коррекций .....	149
3.2.2	Синтез алгоритма управления долготой восходящего узла .....	160
3.3	Общий подход к формированию моделей съемки и сеансов связи...	167
3.3.1	Особенности применения математической модели движения .	169
3.3.2	Съемка земных объектов.....	171
3.3.3	Сеансы связи.....	174
3.4	Модели съемки земных объектов.....	175
3.4.1	Модель съемочного плана.....	175
3.4.2	Съемка точечных объектов.....	181

3.4.3 Особенности съемки площадных объектов .....	183
3.5 Модель передачи целевой информации между КА и ППИ.....	187
3.5.1 Методика расчета условий радиовидимости .....	187
3.5.2 Модель наземной инфраструктуры ППИ .....	189
3.5.3 Модель временных последовательностей сеансов связи с ППИ.....	190
3.6 Модели целевой аппаратуры КА.....	190
3.6.1 Модель изменения памяти в БЗУ .....	190
3.6.2 Модели переориентации бортовой съемочной аппаратуры.....	195
3.7 Выводы по главе 3.....	197
Глава 4. Математические модели КА и элементов НКПОР как составных частей информационной системы.....	200
4.1 Модель расчета показателей эффективности космического аппарата как узла информационной системы .....	204
4.1.1 Расчет объема выходной информации .....	204
4.1.2 Расчет времени выполнения процесса .....	206
4.1.3 Упрощенная модель расчета стоимости.....	206
4.1.4 О подходах к расчету отснятой площади .....	207
4.1.5 Модель расчета суммарной площади .....	214
4.2 Модель расчета показателей эффективности наземных пунктов .....	216
4.2.1 Расчет объема выходной информации .....	217
4.2.2 Расчет времени выполнения процесса .....	218
4.2.3 Упрощенная модель расчета стоимости.....	219
4.3 Модель расчета показателей эффективности при передаче информации .....	220
4.3.1 Расчет времени выполнения передачи информации.....	220
4.1.2 Упрощенная модель расчета стоимости.....	221
4.4 Способы реализации функций $F$ , $T$ , $C$ .....	222
4.5 Выводы по главе 4.....	223
Глава 5. Методика построения и технический облик программно-моделирующего комплекса для оптимизации распределения потоков целевой информации при функционировании космической системы ДЗЗ .....	225
5.1 Назначение, выполняемые функции и алгоритм работы модулей ....	229
5.1.1 Модуль «Баллистика».....	229

5.1.2 Модуль «Анализ».....	230
5.1.3 Модуль «Планировщик» .....	231
5.1.4 Организация межпрограммного взаимодействия.....	232
5.2 Описание модулей.....	235
5.2.1 Модуль «Баллистика».....	235
5.2.2 Модуль «Анализ».....	245
5.2.3 Модуль «Планировщик» .....	256
5.3 Выводы по главе 5.....	271
Глава 6. Результаты экспериментальной отработки распределения потоков целевой информации при функционировании космической системы ДЗЗ ....	274
6.1 Оптимизация распределения потоков целевой информации при функционировании космической системы ДЗЗ.....	275
6.1.1 Сценарий обработки .....	275
6.1.2 Расчет трафика .....	276
6.1.3 Расчет времени выполнения процессов.....	278
6.1.4 Расчет стоимости обработки.....	279
6.1.5 Ограничения .....	280
6.1.6 Результаты экспериментальной отработки .....	280
6.2 Отработка определения стратегии проведения коррекций .....	302
6.2.1 Отработка расчета стратегии проведения коррекций для круговых орбит.....	302
6.2.2 Отработка расчета стратегии проведения коррекций для эллиптических орбит .....	306
6.2.3 Отработка расчета стратегии проведения коррекций для высокоэллиптических орбит.....	309
6.2.4 Отработка расчета стратегии проведения коррекций для низких круговых орбит.....	311
6.3 Выводы по главе 6.....	312
Заключение .....	316
Список сокращений и условных обозначений .....	322
Список литературы .....	324

## Введение

### Актуальность темы исследования

Одним из ключевых элементов космической системы дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) является единая территориально-распределенная информационная система (ЕТРИС), предназначенная для создания и распространения по заявкам потребителей информационных продуктов, которые производятся на базе информации дистанционного зондирования, получаемой с помощью целевой аппаратуры космических аппаратов (КА) входящих в различные орбитальные группировки (ОГ). Она представляет собой сложную организационно-техническую систему, в которой функционирует множество объектов. Упорядоченные процессы взаимодействия объектов друг с другом образуют автоматизированный технологический процесс создания космических снимков, их многоступенчатой обработки, хранения и распространения.

В настоящее время основными трендами мировой индустрии ДЗЗ являются:

1. Существенное наращивание орбитальной группировки КА ДЗЗ.
2. Существенный рост коммерческой составляющей ДЗЗ, в первую очередь в части многоспутниковых систем
3. Кратное уменьшение периодичности наблюдений территории с помощью национальной группировки в том числе и за счет использования мобильных пунктов приема информации (ППИ).
4. Переход от «статичной» съемки к видеонаблюдению из космоса.
5. Увеличению суточных объемов данных наблюдения высокого и среднего разрешения.
6. Уменьшению периодичности обновления сплошного покрытия Земли до одного-двух дней.

Наращивание орбитальной группировки КА ДЗЗ и увеличение ее производительности обуславливает значительное увеличение объёмов принимаемых и обрабатываемых в системе данных. В этой связи возникает необходимость построения оптимальной наземной космической инфраструктуры

(НКИ) в части приема, обработки, хранения и распространения данных ДЗЗ. Важнейшим условием при этом становится создание современных комплексов приёма данных с КА ДЗЗ на основе разработки совместимых между собой семейств унифицированных компонентов, а также создание комплексов обработки и хранения информации с использованием современных технологий вычислений. Очевидно, что в отмеченных условиях существующий традиционный путь создания и использования наземных средств по-отдельности, в рамках каждой разрабатываемой космической системы приведёт к нерациональному расходованию ресурсов, дублированию при создании аппаратно-программных средств, отсутствию технической, информационной и организационной совместимости.

Кроме того, возможности наземных центров обработки информации при существующем подходе к организации технологических процессов с учётом сложившегося к настоящему времени разрозненного порядка создания наземных комплексов ДЗЗ и состоянии инфраструктуры приёма, обработки и доведения данных ДЗЗ до потребителей показывают исчерпанность применяющихся научных подходов к обеспечению конкурентоспособных уровней производительности и оперативности технологических процессов ДЗЗ. Данное обстоятельство требует выработки новых системных и прикладных решений.

Таким образом, вопрос поиска новых решений важной научной проблемы управления потоками целевой информации при функционировании космической системы ДЗЗ, как единой информационной системы является актуальной и практически важной задачей.

### **Степень разработанности темы исследования**

Анализ публикаций на данную тему и результаты работ, выполненных авторами: В.Т. Бобронниковым, А.А. Емельяновым, К.А. Заниным, Е.А. Лупян, В.В. Малышевым, О.П. Нестеренко, Ю.И. Носенко, Ю.Н. Разумным, Г.Г. Райкуновым, Н.Н. Севастьяновым, В.А. Селиным, Ю.А. Смольяниновым и др., позволил определить основные особенности построения и функционирования систем ДЗЗ с точки зрения создания готовых информационных продуктов, а также

путей исследований, направленных на определение общих принципов и методов решения поставленной задачи.

В работах этих и других авторов излагались теоретические основы и подходы к построению сложных информационных систем ДЗЗ [8, 11, 13, 16, 17, 23-31, 41-46, 50-57, 59-61, 82, 93, 10], исследовались модели движения и принципы управления КА [5, 7, 44, 51, 55, 71, 77, 86, 90, 91, 94, 97, 99, 107, 109-101], работа целевой аппаратуры и служебных систем [8, 23-32, 41-46, 57-58, 70], обработка данных ДЗЗ [6, 20, 22, 49, 58, 73, 79, 89, 96]. Вместе с тем, в настоящее время появилась объективная возможность совершенствования существующей единой территориально-распределенной системы ДЗЗ на базе имеющихся и строящихся центров сбора, обработки и распространения спутниковых данных. В рамках этой системы остается еще ряд нерешенных задач, в частности, связанных с автоматизацией распределения больших потоков целевой информации, которые представляют собой перенос результатов специальной обработки информации элементами системы с учетом определенных правил от источника к получателю.

### **Объект исследования**

В диссертационной работе в качестве объекта исследования рассматривается космическая система дистанционного зондирования Земли как единая территориально-распределенная информационная система, одной из главных задач которой является предоставление потребителю готового информационного продукта.

### **Предмет исследования**

Алгоритмические и программные средства распределения потоков целевой информации при функционировании системы ДЗЗ, как сложной информационной системы, являются предметом исследования данной диссертационной работы.

### **Цель диссертационной работы**

Данная работа направлена на формирование методики, теоретического и прикладного задела для решения проблемы организации эффективной работы со сверхбольшими, постоянно растущими объемами информации в системе ДЗЗ, требующими сложной специализированной обработки.

Для достижения поставленной цели решаются следующие **научно-технические задачи**:

1. Проводится системный анализ и формализация задачи управления потоками целевой информации при функционировании космической системы ДЗЗ как сложной информационной системы. Выявляются требующие дальнейшей формализации основные объекты и рабочие процессы системы.

1. Проводится анализ и формируются показатели эффективности, формулируется техническая постановка задачи.

2. Формулируется математическая постановка, разрабатывается методический подход к решению и условия применимости задачи оптимизации распределения потоков целевой информации.

3. Разрабатывается система взаимосвязанных математических моделей функционирования составных частей космической системы ДЗЗ как сложной информационной организационно-технической системы:

- модели заявки потребителя;
- модели наземного комплекса приема, обработки и распределения информации (НКПОР);
- модели орбитальной группировки, включая модели: эволюции орбит КА ДЗЗ, стратегии коррекций, съемки наземных объектов и организации сеансов связи;
- модели линий передачи целевой информации между элементами системы.

4. Определяются принципы построения и технический облик программно-моделирующего комплекса.

### **Научная новизна**

В работе изложены научно обоснованные технические решения, обладающие новизной и научной значимостью:

1. Предложено рассматривать задачу управления потоками целевой информации в космической системе ДЗЗ как новую, единую задачу распределения процессов ее обработки по элементам космической и наземной инфраструктуры;

2. Обосновано объективное свертывание вектора разнородных показателей эффективности и переход к частным показателям типа «оперативность-стоимость»;

3. Впервые сформировано единое представление математической модели элементов системы как функции преобразования объема входной информации в объем выходной информации при наличии ограничений.

4. Впервые обоснована возможность сведения задачи распределения процессов обработки информации по элементам космической и наземной инфраструктуры к задаче одно или двухкритериальной оптимизации с поиском решения на графе.

5. Предложены единые, взаимосвязанные модели для расчета показателей эффективности для каждого элемента системы.

6. Сформированы математические модели и алгоритмы для формирования ограничений по возможностям проведения съемки, основой которых стали модели формирования стратегии коррекций КА ДЗЗ в части определения интервалов активных участков орбит, компенсирующих их деградацию.

7. Определены требования, предъявляемые к новому специализированному программно-математическому обеспечению и разработана методика создания программно-моделирующего комплекса для оптимизации распределения потоков целевой информации при функционировании космической системы ДЗЗ.

### **Практическая значимость результатов исследования**

Результаты, полученные в диссертационной работе, могут найти дальнейшее применение для развития существующей космической системы ДЗЗ как единой территориально-распределенной информационной системы. Их практическая значимость заключается в следующем:

1. Подтверждена возможность повышения общего уровня планирования процессов распределения потоков целевой информации по составным частям информационной системы в целом.

2. Подтверждена возможность повышения уровня автоматизации распределения потоков целевой информации по составным частям информационной системы в целом.

3. Подтверждена возможность оптимизации распределения процессов обработки результатов съемки по разным ППИ с учетом их производительности, а также территориального и временного факторов.

4. Предложен подход к формированию системы взаимосвязанных математических моделей функционирования космического и наземного сегментов как элементов единой информационной системы.

5. Предложен подход к формированию стратегии коррекций КА ОГ ДЗЗ.

6. Представлена возможность анализа состава и топологии наземных центров с точки зрения определения основных показателей и проведения дальнейших системных исследований.

Основные результаты работы получены и использованы в рамках Федеральной космической программы России на 2016 – 2025 годы по теме «Системные исследования и разработка программно-методической базы для моделирования технологических процессов ЕТРИС ДЗЗ», а также в рамках выполнения государственного задания по проекту № 9.7505.2017/БЧ «Разработка методики системного проектирования оптимальных структур орбитальных многоцелевых группировок КА, принципов и методов их построения в целях обеспечения реализации задач наблюдения, навигации и связи»

### **Методология и методы исследования**

В качестве методологической основы используется системный подход. На нем основывается раздельное формирование моделей и алгоритмов функционирования космического и наземного информационных сегментов как составных частей космической системы ДЗЗ, выбора показателей эффективности и ограничений с последующей отработкой в рамках единой базовой подсистемы. – типового унифицированного программного средства, методический и алгоритмический аппарат которого позволяет решать широкий круг задач по распределению потоков целевой информации.

Основными методами исследования, используемыми в работе, являются методы динамики полета, теории управления, методы подготовки данных, методы оптимального управления и обработки информации. При программной реализации математического обеспечения используются методы объектно-ориентированного программирования и мультизадачность операционных систем Windows

### **Положения, выносимые на защиту**

На защиту выносятся:

1. Теоретические основы и методика решения проблемы управления потоками целевой информации при функционировании космической системы ДЗЗ, как сложной, территориально-распределенной организационно-технической информационной системой, основной задачей которой является реализация полного цикла обслуживания, начиная с формирования заявки и заканчивая предоставлением готового тематического продукта.

2. Архитектура и состав взаимосвязанных математических моделей, составляющие основу процессов обработки и предназначенные для формирования потоков целевой информации в космической системе ДЗЗ.

3. Методика построения и технический облик программно-моделирующего комплекса для оптимизации распределения потоков целевой информации при функционировании космической системы ДЗЗ, на основе которых автором разработан комплекс программ.

4. Результаты экспериментальной отработки распределения потоков целевой информации в космической системе ДЗЗ в условиях, приближенных к реальным, в том числе:

- подтверждающие адекватность предложенных методики и математических моделей решения задачи распределения целевой информации при функционировании космической системы ДЗЗ, включающей в себя разнотипные космические аппараты и наземный комплекс приема обработки и распределения информации;

- подтверждающие широкие возможности по настройке моделируемой системы, как по составу, так и по характеристикам.
- подтверждающие возможность использования методики и математических моделей, а также созданного на их основе программного обеспечения как инструмента для обоснования направлений модернизации и унификации существующей ЕТРИС ДЗЗ.

### **Степень достоверности и апробация результатов**

Достоверность результатов подтверждается корректным использованием современной теории системного анализа и оптимального управления, использованием апробированного математического аппарата, обоснованием полученных результатов математическими расчетами и проведенным сравнительным анализом полученных результатов экспериментальной отработки с реальными данными.

Апробация работы проведена на научно-технических семинарах кафедры «Системный анализ и управление» МАИ. Результаты работы докладывались и получили одобрение на научно-технических советах Научного центра оперативного мониторинга Земли АО «Российские космические системы» в рамках составной части НИР по теме «Системные исследования и разработка программно-методической базы для моделирования технологических процессов ЕТРИС ДЗЗ» (2017, 2018 г.г.), на научно-технических конференциях: 22-й, 23-ей и 24-ой Международной научной конференции «Системный анализ, управление и навигация» (2017, 2018, 2019 г.г.), XLIV Международной молодежной научной конференции «Гагаринские чтения» (Москва, 2018 г.), 15-й и 16-й Международной конференции «Авиация и космонавтика» (2016, 2017 г.г.), 3rd IAA Conference on Dynamics and Control of Space Systems (DYCOSS 2017), 4th IAA Conference on Dynamics and Control of Space Systems (DYCOSS 2018), VI научно-технической конференции молодых ученых и специалистов центра управления полетами ЦНИИмаш (2016 г.) Applications of Global Navigation Satellite Systems, [www.unoosa.org](http://www.unoosa.org) (2010) и др.

### **Личный вклад и публикации**

Все исследования, результаты которых изложены в диссертационной работе, проведены лично соискателем в процессе научной деятельности. Эти исследования включают формализацию задачи, техническую и математическую постановку, разработку моделей, применение вычислительных методов, создание программного комплекса, расчеты и анализ результатов. Из совместных работ в диссертацию вошел только тот материал, который непосредственно принадлежит соискателю; заимствованный материал обозначен ссылками. Основные результаты опубликованы в 30 работах, из которых 12 – в изданиях из списка ВАК Минобрнауки России, соответствующих специальности 05.13.01 (авиационная и ракетно-космическая техника), 5 – опубликованы в иностранных изданиях, индексируемых в международных базах данных.

### **Структура и объем работы**

Работа состоит из введения, шести глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений и списка использованных источников.

Диссертация содержит 338 страниц, 105 рисунков, 45 таблиц. Список использованных источников содержит 122 наименования.

### **Основное содержание работы**

**В первой главе** проведена декомпозиция космической системы ДЗЗ, как сложной информационной системы, определены системные и потребительские характеристики ее элементов, такие как: космические аппараты, наземная космическая инфраструктура, ее характеристики и функциональные возможности, сформированы показатели эффективности системы. Обоснована возможность провести объективное свертывание показателей эффективности и перейти к частным, характеризующих эффективность целевого функционирования системы в целом.

В результате появилась возможность представить задачу распределения потоков целевой информации при функционировании космической системы ДЗЗ как последовательность, состоящую из формирования заявки, определение перечня запросов к системе и соответствующую последовательность процессов обработки

с последующей оптимизацией их распределения процессов по элементам космической системы ДЗЗ с учетом выбранных показателей эффективности и имеющихся ограничений.

**Во второй главе** предложен общий методический подход к решению поставленной технической задачи управления, который включает в себя: формулировку математической постановки оптимизационной задачи, выбор общего подхода к ее решению и определение условий применимости. Определен перечень и даны характеристики моделей, необходимых для математической постановки задачи, включающие в себя: единую модель процесса обработки информации космическим сегментом и наземным сегментом и модель передачи данных. Сформулирована математическая постановка оптимизационной задачи и перечень моделей для дальнейшей разработки.

**В третьей главе** содержится описание взаимосвязанных математических моделей орбитальной группировки как составных частей информационной системы, основной задачей которой является съемка наземных объектов и формирования начального объема информации для ее дальнейшей обработки. К ним относятся:

- модель движения в задаче определения и прогнозирования состояния КА, а также проведения орбитальных коррекций;
- модели описания земных объектов
- модель проведения съемки, включая модели целевой аппаратуры;
- модели проведения сеансов связи и передачи целевой информации между КА и ППИ.

**В четвертой главе** предложена обобщенная форма представления модели потока целевой информации космической системы ДЗЗ как взаимосвязанная последовательность функций изменения объема информации при применении к нему соответствующего процесса обработки (функций изменения трафика). При этом каждый элемент является функцией преобразования объема входной информации в объем выходной информации инвариантно к ее тематическому содержанию, при одновременном вычислении показателей эффективности с

учетом имеющихся ограничений. Предложены и обоснованы способы программной реализации таких функций, позволяющих обеспечить в дальнейшем открытость ее архитектуры.

**Пятая глава** посвящена вопросам, связанным с разработкой методики построения и технического облика программно-моделирующего комплекса для оптимизации распределения потоков целевой информации при функционировании космической системы ДЗЗ, который реализует предложенную модель организации потоков целевой информации и обеспечит возможность выполнения функций, связанных с определением состава и характеристик системы, формированием сценариев работы с данными и потоков целевой информации, проведения расчетов и анализа результатов. Основным предназначением программного комплекса являются решение оптимизационных задач планирования распределения потоков целевой информации по элементам космической системы ДЗЗ и проведение оценок текущего состояния инфраструктуры с точки зрения возможностей обработки заявок потребителей и выявлять возможное возникновение проблем в будущем.

**В шестой главе** представлены результаты экспериментальной отработки, основной целью которой являлось подтверждение корректности и адекватности разработанных в работе методик, математических моделей и алгоритмов решения задачи распределения потоков целевой информации в условиях, приближенных к реальным, определения возможностей по настройке состава и характеристик для реальной моделируемой системы, а также подтверждения возможности использования его как инструмента по проведению дополнительных системных исследований для обоснования направлений дальнейшей модернизации космической системы ДЗЗ в части реализации механизмов распределения потоков целевой информации.

## **Глава 1. Формализация задачи управления потоками целевой информации при функционировании космической системы ДЗЗ**

Целью работы является формирование теоретического и прикладного задела для организации эффективной работы со сверхбольшими, постоянно растущими объёмами информации, поступающими в настоящее время от систем ДЗЗ и требующими сложной специализированной обработки. В качестве объекта исследования рассматривается составная часть космической системы ДЗЗ, одной из главных задач которой является предоставление потребителю готового информационного продукта. Создание готового продукта, в свою очередь, предполагает последовательное выполнение этапов обработки с учетом специальных правил и перенос их результатов от источника к потребителю. В дальнейшем, такой перенос будем называть потоком целевой информации.

### **1.1 Состояние и проблемы развития систем ДЗЗ**

Космическая система ДЗЗ состоит из орбитальной группировки космических аппаратов и наземной космической инфраструктуры. Результаты анализа литературных и электронных источников информации [9, 10, 33-35, 89, 93, 101] позволяют сформулировать ряд общих тенденций развития космических систем ДЗЗ, а также построения их орбитальных группировок:

- существенное наращивание орбитальной группировки и объемов данных КА ДЗЗ;
- рост потребностей в данных ДЗЗ;
- глобализация;
- персонализация;
- коммерциализация (конкурентоспособность);

1. Существенное наращивание орбитальной группировки и объемов данных КА ДЗЗ. В период до 2020 года планируется развитие российской орбитальной группировки ДЗЗ до минимально необходимого состава 22 аппаратов. В период до 2025 планируется обеспечение круглосуточного и всепогодного наблюдения территории России, при пространственном разрешении наблюдения в видимом

диапазоне от 1 до 0,4 метра, что будет соответствовать современному мировому уровню. Это должно быть обеспечено за счет:

- в видимом диапазоне - переходом от линзовой оптико-электронной аппаратуры наблюдения к зеркальной, установленной на КА «Ресурс-ПМ»;
- в радиолокационном диапазоне – созданием КА радиолокационного наблюдения «Обзор-Р» с пространственным разрешением до 1 метра;
- в ИК-диапазоне – созданием КА мониторинга чрезвычайных ситуаций «Обзор-О», оснащенных аппаратурой наблюдения в ИК-диапазоне с пространственным разрешением до 80 метров.

На период до 2030 года планируется создание:

- КА «Ресурс-Ч», обеспечивающего сверхвысокое разрешение до 0,2 метра;
- оптико-электронного КА «Репортер», обеспечивающей мониторинг чрезвычайных ситуаций с геостационарной орбиты с разрешением 5-10 метров;
- КА «Лидер», обеспечивающий круглосуточный всепогодный мониторинг техногенных и природных ЧС в ИК, видимом и СВЧ диапазонах спектра.

Наращивание орбитальных группировок и их характеристик предполагается и другими странами (таблица 1.1).

Таблица 1.1 – Состояние и перспективы мировой группировки ДЗЗ сверхвысокого и высокого разрешения

	США/ Канада		ЕС		Индия		Китай	
	2018	2025	2018	2025	2018	2025	2018	2025
<b>ВБИК – СВР</b>	19	40+	2	5	5	10+	8	100+
<b>ВБИК – ВР</b>	240	400+	8	20+	5	10+	12	200+
<b>РЛ</b>	1	10+	7	10+	5	3	1	4

ВБИК – средства наблюдения в видимом и ближнем ИК-диапазонах

СВР – сверхвысокое пространственное разрешение

ВР – высокое пространственное разрешение

Кроме того, в настоящее время наметился переход от одиночных крупногабаритных космических аппаратов ДЗЗ к группировкам (кластерам) распределенных в космическом пространстве космических аппаратов, насчитывающих десятки и даже сотни КА. Активно развиваются такие проекты, как PlanetLabs, SkySat (Terra Bella, США, California), Vivid-X2 (Surrey Satellite Technology, Великобритания, съемка видео и высокое разрешение  $< 1$  м), ICEYE (Финляндия, радарная группировка микроаппаратов), UNISAT (GAUSS Srl, Италия) и т.д. При этом широкий спектр вопросов, принципиально недоступный ранее может быть решен группировкой космических аппаратов и распределением подзадач внутри группы.

Таким образом, наращивание орбитальных группировок КА ДЗЗ с учетом малых КА приведет к кратному увеличению количества спутников – источников информации. Учитывая эти тенденции, можно с уверенностью сказать, что это приведет к экспоненциальному росту объемов передаваемой и обрабатываемой информации в системе ДЗЗ в целом. По оценкам АО «Российские космические системы» [35, 93, 101] только каталогизация и автоматическая потоковая обработка в темпе поступления до уровня [6] всего объема принимаемой информации от существующей и перспективной российской ОГ КА ДЗЗ будет составлять:

- 2018 г. – до 3 ТБ/сут.;
- 2020 г. – до 6 ТБ/сут.;
- 2025 г. – до 18 ТБ/сут.

Обеспечение автоматической потоковой обработки и предоставления (в дополнение к обработке всего потока L0 и 2A) будет составлять:

- продуктов стандартных уровней обработки: до 3 ТБ/сут.;
- базовых продуктов межведомственного использования: до 6 ТБ/сут.;
- продуктов интерактивной обработки: 3 ТБ/сут.

А общий суточный объем загружаемой «онлайн» информации до 2020 г. может составить до 17 ТБ.

При этом, системы хранения и обмена данными должны обеспечить среднюю скорость загрузки данных пользователями в многопользовательском режиме до 25 Мбит/сек.

2. Рост потребностей в данных ДЗЗ и глобализация. По данным АО «Российские космические системы» [93, 101] в России наблюдается существенный рост потребностей в данных космической съемки высокого и сверхвысокого разрешения. В частности:

- 23-30 районов территории России требуется наблюдать ежедневно до 2-3 раз;
- требуется ежегодное 10-кратное покрытие территории России, при этом размах съемки по долготе – более 12 тыс. км., по широте – 5 тыс. км.;
- в съемочный сезон (апрель – октябрь) до 40-60% территории России ежесуточно закрыто облачностью.

На рисунке 1.1 представлена требуемая частота наблюдения территории России по данным за 2017-2018 г.г. [93, 101].

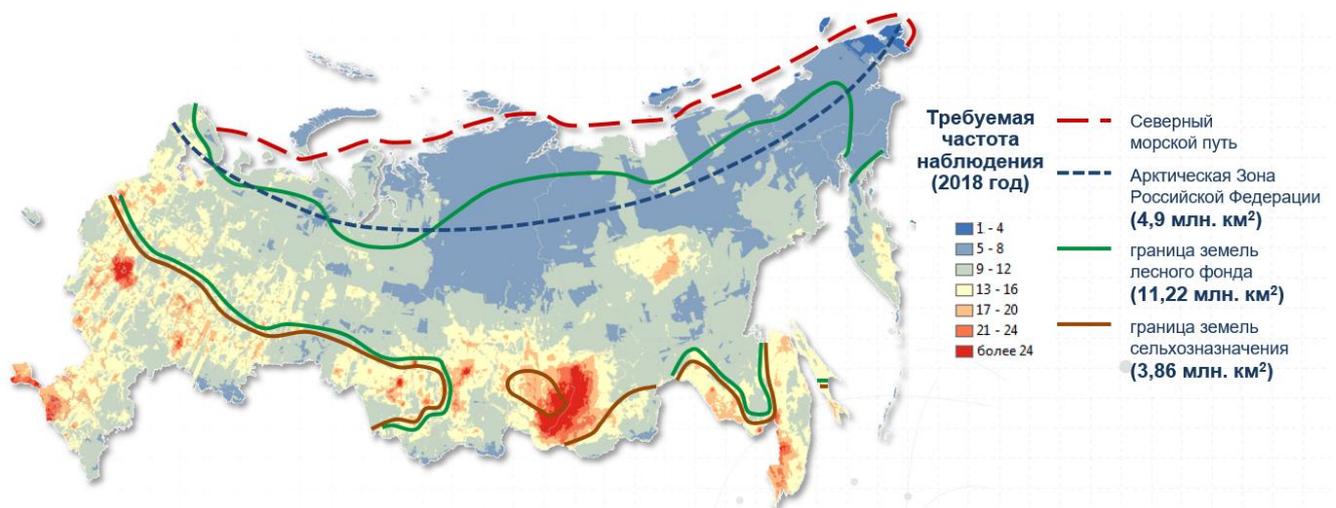


Рисунок 1.1 – Требуемая плотность наблюдения территории России (2017-2018 г.г.)

Структура потребности в данных ДЗЗ по видам деятельности имеет следующий вид [35]:

- комплексная безопасность (чрезвычайные ситуации, специальные потребители, мониторинг урожайности и др.) – порядка 42%;

- хозяйственная деятельность (сельское и лесное хозяйство, инфраструктурные проекты, транспорт, картография, кадастр и др.) – порядка 38%;
- коммерческие сервисы и космическая съемка с предоставлением результатов в режиме реального времени – порядка 20%.

При этом наблюдается существенная динамика в росте последней составляющей.

3. Глобализация - доступность услуг ДЗЗ в любой географической точке в любое время, при которой потребитель может получать тематическую информацию, а также находиться в зоне обслуживания какой-либо орбитальной группировки КА системы. При этом подразумевается не только обеспечение обмена данными между потребителем и исполнителем, но и:

- обеспечение онлайн-доступа ко всему объёму хранимой информации ДЗЗ;
- полномасштабное внедрение методов GeoBigData и переход к парадигме распределённой обработки;
- внедрение технологий автоматического (потокowego) формирования стандартных и базовых продуктов на основе микросервисов в режиме «онлайн»;
- автоматическое формирование динамических покрытий по заданному набору архивных данных;
- предоставление сервисов по доступу к данным, продуктам и процедурам их обработки.

При этом от вида орбит КА и построения орбитальных группировок ДЗЗ напрямую зависит, будет ли требование по глобальности услуг системы выполнено.

4. Персонализация – это максимальное приближение тематических продуктов к конечному потребителю, независимо от его местонахождения при обязательном условии обеспечения необходимого присутствия российских средств ДЗЗ во всех сегментах информационного обеспечения при решении главных задач

комплексной безопасности и развития экономики страны. Персонализация предполагает:

- гарантированность своевременного выполнения заявок пользователей на получение требуемых данных (тематических продуктов)
- соответствие характеристик получаемых продуктов требованиям пользователей
- наличие удобных механизмов и интерфейсов доступа к данным (тематическим продуктам) и сервисам со стороны персонифицированных пользователей
- прозрачное и лояльное к пользователю правовое поле, регламентирующее порядок обращения с данными (тематическими продуктами)

Можно выделить как минимум 4 основных класса потребителей:

- академические потребители – представители научного и образовательного сообщества, использующие данные ДЗЗ для научных исследований;
- госсектор – органы исполнительной власти федерального и регионального уровня, решающие прикладные задачи в масштабах всей страны и отдельных территорий (областей, районов, муниципалитетов);
- коммерческие/частные потребители – хозяйствующие субъекты различных форм собственности, осуществляющие различные виды экономической деятельности, не связанной явно с обеспечением государственных нужд;
- некоммерческие организации – организации (в т.ч. международные), решающие социальные задачи на некоммерческой основе (природоохранные, образовательные, социальные и др.).

Потребность в тематических продуктах по отраслям применения представлена на рисунке 1.2 [35].



Рисунок 1.2 – Потребность в тематических продуктах ДЗЗ по отраслям применения

5. Коммерциализация (конкурентоспособность). В настоящее время наблюдается рост коммерческой составляющей ДЗЗ, в первую очередь в части многоспутниковых систем. Например, для российских заказчиков имеет место более чем двукратное увеличение (см. рисунок 1.3) при все увеличивающейся коммерческой составляющей [35].

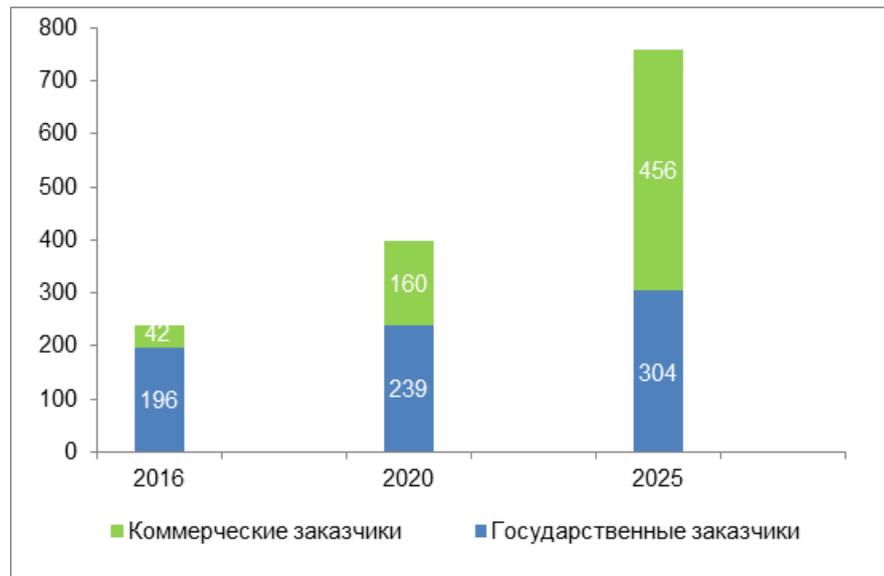


Рисунок 1.3 – Потребность российских заказчиков в данных ДЗЗ (млн. дол.)

При этом в коммерческой составляющей увеличивается доля тематического продукта, ориентированного на конкретного потребителя.

Анализ тенденций развития показывает, что современные системы ДЗЗ уже перестают быть только источниками космических снимков различного разрешения в различных спектральных диапазонах, а становятся полноценными информационными системами, включающими в себя как источники космической информации, так и средствами хранения, обработки, создания тематического продукта и передачи его конечному потребителю. В рамках этой концепции в Российской Федерации к 2022 году должна быть создана отечественная цифровая платформа сбора, обработки, хранения и распространения данных дистанционного зондирования Земли из космоса, обеспечивающая потребности граждан, бизнеса и власти (проект «Цифровая Земля», утвержден Правительством Российской Федерации 28.07.2018 в рамках программы «Цифровая экономика Российской Федерации», исполнитель: Госкорпорация «Роскосмос»). В рамках этого проекта предполагается создание и регулярное обновление сплошного бесшовного покрытия данными ДЗЗ территории всего земного шара [118]. Точность составит около 1 м с периодической актуализацией. «Цифровая Земля» ляжет в основу целого семейства новых геоинформационных сервисов. Данный проект ориентирован на широкий круг потребителей: государственные структуры, крупный и средний бизнес, массовый потребитель. Одним из ключевых звеньев в

данном проекте является создаваемая под руководством АО «Российские космические системы» Единая территориально-распределенная информационная система (ЕТРИС) ДЗЗ. Целью ЕТРИС ДЗЗ является комплексное обеспечение:

- управления целевым применением российских космических аппаратов ДЗЗ;
- приема информации;
- обработки информации и формирования тематического продукта;
- передачи результатов конечным потребителям.

ЕРРИС ДЗЗ как информационная система включает в себя:

- космический сегмент, целью которого является генерация первоначального объема информации уровня L0;
- географически распределенный наземный комплекс приема, обработки и распространения информации, целью которого, в конечном итоге, является формирование тематического продукта, предназначенного для потребителя;
- средства приема и передачи данных между элементами системы.

ЕТРИС ДЗЗ обеспечивает реализацию процессов [118]:

- 1) Планирование и управление процессами получения информации ДЗЗ:
  - координация целевого применения орбитальной группировки космических аппаратов путем распределения их ресурсов, комплексного (взаимоувязанного) планирования съемок объектов и районов в соответствии с поставленными задачами;
  - комплексное планирование сеансов связи по сбросу космической информации на станции приема;
  - согласованное управление наземной группировкой средств ДЗЗ;
  - координация планов по поставке материалов с зарубежных КА ДЗЗ в интересах государственных потребителей.

2) Прием и обработка данных ДЗЗ

- прием, регистрация и обработка всего потока космической информации, поступающей с КА различного типа.

3) Хранение, распространение и обеспечение доступа потребителей к данным ДЗЗ

- архивирование и хранение данных ДЗЗ, поступивших с отечественных и зарубежных КА ДЗЗ;
- обеспечение доступа потребителей к информации ДЗЗ через систему геопорталов.

Разработка продуктов и сервисов ЕТРИС включает в себя следующие этапы [35]:

- разработка сплошного покрытия на пилотные районы и внедрение базовых тематических сервисов (сельское, лесное хозяйство, инфраструктура) – 2017 г.;
- разработка сплошного покрытия: первоочередные районы (Москва, МО, СПб, Краснодарский, Хабаровский, Приморский края – 2018 г.; приоритетные зоны (до 20% территории РФ); вся территория РФ – 2020 г.г.;
- разработка базовых тематических сервисов
- первоочередные районы – 2018 г.; приоритетные зоны – 2019 г.; вся территория РФ – 2020 г.

На данном этапе создания ЕТРИС ДЗЗ выявлена [35] объективная неготовность средств наземной космической инфраструктуры (НКИ) ДЗЗ к решению задачи создания периодически обновляемого высокоточного сплошного бесшовного покрытия всей территории РФ в условиях кратного увеличения числа КА и объемов информации. Это вызвано различными причинами, среди которых можно выделить:

- неоптимальность структуры хранения данных;
- низкую пропускную способность (производительность) средств обеспечения доступа к данным;

- отсутствие «онлайн» (оперативного) доступа ко всему массиву архивных данных, необходимость восстановления данных из архива;
- зависимость системы обработки данных от места их хранения, длительность восстановления данных;
- отсутствие «прозрачных» механизмов доступа к данным, содержащихся в территориально удаленных сегментах архива, зависимость производительности системы от каналов связи;
- низкий уровень автоматизации процессов формирования тематического продукта;
- низкий уровень планирования процессов распределения потоков целевой информации по составным частям ЕТРИС ДЗЗ системы.

Последнее диктует необходимость четкой технической и математической формализации процессов целевого функционирования современных систем ДЗЗ, оптимизации планирования процессов и эффективности их целевого функционирования. Это напрямую зависит как от состава, построения и управления орбитальной группировкой, так и от механизмов обработки данных и доведения готовых тематических продуктов до потребителя.

## **1.2 Основные объекты системы**

Современная космическая система ДЗЗ представляет собой сложную человеко-машинную систему, в которой функционирует множество объектов. Упорядоченные процессы взаимодействия объектов друг с другом образуют автоматизированный технологический процесс создания космических снимков, их многоступенчатой обработки, хранения и распространения. В этом смысле она может быть рассмотрена как информационная система, включающая в свой состав как космические аппараты и всю инфраструктуру организации информационного взаимодействия с ними и единую территориально-распределенную информационную систему дистанционного зондирования Земли.

Космическая системы ДЗЗ предназначена для создания и распространения по заявкам потребителей информационных продуктов, которые производятся на базе

информации дистанционного зондирования, получаемой с помощью целевой аппаратуры КА российской орбитальной группировки [37]. Она представляет собой сложную человеко-машинную систему, в которой функционирует множество объектов. Упорядоченные процессы взаимодействия объектов друг с другом образуют автоматизированный технологический процесс создания космических снимков, их многоступенчатой обработки, хранения и распространения.

Таким образом, основными объектами системы, свойства и взаимодействие которых определяют возможности космической системы ДЗЗ как сложной информационной организационно-технической системы, являются:

- КА и их целевая аппаратура;
- наземная космическая инфраструктура;
- производимые системой информационные продукты;
- потребители;
- заявки;
- циклограммы
- снимки и маршруты.

### **1.2.1 Космические аппараты и их целевая аппаратура**

В составе орбитальной группировки эксплуатируются космические аппараты серий «Ресурс-П», Белорусский КА ДЗЗ, «Канопус-В», «Канопус-ИК», «Метеор-М». Планируемое баллистическое построение орбитальной группировки представлено в таблицах 1.2, 3 [100].

Таблица 1.2 – Баллистическое построение ОГ КА ДЗЗ 2020 г.

Наименование ОГ КА	Высота, км	Наклонение, град.	Период обращения, мин	Количество витков в сутки	Полоса обзора, км	Полоса захвата, км	Периодичность наблюдения на данное построение
Ресурс-П №1	477.5	97.3	94	15.33	950	38	Общая периодичность 1 раз в сутки (25°)
Ресурс-П №4, №5	477.5	97.3	94	15.33	950	38	
Канопус «В+ИК»	510	97.45	94.75	15.2	880	20	Общая периодичность 1 раз в сутки (25°) «В-ИК»–1 раз в 2 суток
Канопус №3,4	510	97.45	94.75	15.2	880	20	
Канопус №5,6	510	97.45	94.75	15.2	880	20	
Кондор 2КА	518.73	97	94.74	15.195	2*500	500	2-4 раза в сутки в зависимости от режима съемки

Таблица 1.3 – Баллистическое построение ОГ КА ДЗЗ 2025 г.

Наименование ОГ КА	Высота, км	Наклонение, град.	Период обращения, мин	Количество витков в сутки	Полоса обзора, км	Полоса захвата, км	Периодичность наблюдения на данное построение
Ресурс-П №5-	477.5	97.3	94	15.33	950	38	1 раз в 3 суток
Ресурс-ПМ №1-2	725	~97	~100	~15	950	38	Общая периодичность 2 раза в сутки
Ресурс-ПМ №1-2	725	~97	~100	~15	950	38	
Обзор-Р №1	720	~97	~100	~15	2*750	750	2-4 раза в сутки в зависимости от режима съемки
Обзор-Р №2	510	97.45	94.75	15.2	2*750	750	
Кондор ФКА №1, №2	518.73	97	94.74	15.195	2*500	500	2-4 раза в сутки в зависимости от режима съемки

Целевая аппаратура этих КА позволяет вести одновременную съемку в нескольких узких спектральных интервалах внутри разных спектральных диапазонов (в основном, в видимом и инфракрасном (ИК)) с пространственным разрешением от 1м и периодичностью не хуже 3 суток (Ресурс-П/Геотон-Л1, панхроматический режим) до 1 км при периодичности от 0,5 до 0,25 час (Электро-Л/МСУ-ГС). Используемые спектральные диапазоны не позволяют вести съемку

районов, закрытых облачностью. В таблице 1.4 представлены носители целевой аппаратуры с указанием сенсоров, а также параметры съемки соответствующее баллистическому построению.

Таблица 1.4 – Параметры съемки территории РФ ОГ КА ДЗЗ 2017-2025 г.г.

Диапазон	Разрешение (проекция пиксела)	Аппаратура	КА	Периодичность
<b>2017</b>				
Видимый	1-10м 10-100м 100-1000м	ОЭА, ПСС, МСС КМСС	Ресурс, Канопус Метеор Электро	1-3* 3 48**
ИК	200м 500м	МСУ МСУ-МР	Канопус-В-ИК Метеор-М	1-2 3-6
<b>2020</b>				
Видимый	1-10м 10-100м 100-1000м	ОЭА, ПСС, МСС КМСС	Ресурс, Канопус Метеор Электро, Арктика	2-4 4 48**
ИК	200м 500м	МСУ МСУ-МР	Канопус-В-ИК Метеор-М	1-2 4-8
РЛ	1-3м	РСА	Кондор-ФКА	2-4***
<b>2025</b>				
Видимый	1-10м 10-100м 100-1000м	ОЭА, ПСС, МСС КМСС	Ресурс-ПМ Метеор Электро, Арктика	2 4 48
ИК	500м	МСУ-МР	Метеор-М	4-8
РЛ	1-3м	РСА АФАР	Кондор-ФКА Обзор-Р	2-4*** 2-4***

Данные соответствуют крайней южной точке России (41°11' с. ш., 47°47' в. д.)

\*\* Наблюдается не вся территория России

\*\*\* В зависимости от режима съемки

Основные характеристики КА «Ресурс-П» и его целевой аппаратуры представлены в таблицах 1.5 и 1.6.

Таблица 1.5 – Основные параметры КА «Ресурс-П»

Наименование характеристики	Ед. изм.	№ 1	№ 2	№ 3
Масса КА	кг	6275	6275	6275
Масса полезной нагрузки	кг	2258	2258	2258
Высота орбиты	км	475	475	475
Наклонение	град	97,276	97,276	97,276
Периодичность	сут.	≤ 3	≤ 3	≤ 3
Отклонение оси визирования по крену	град	-45 до +45	-45 до +45	-45 до +45
Отклонение оси визирования по тангажу	град	-45 до +45	-45 до +45	-45 до +45
Угловая скорость перенацеливания оси визирования	град/с	1	1	1
Средняя производительность съемки в панхроматическом режиме	км <sup>2</sup> /сут	80000	80000	80000
С.к.о. координатной привязки снимка ОЭА в надир без опорных точек	м	≤ 10-15	≤ 10-15	≤ 10-15
Частотный диапазон передачи целевой информации	ГГц	8,2	8,2	8,2
Объем БЗУ <sup>1</sup>	Гбит	1200	1200	1200

Таблица 1.6 – Характеристики сенсоров КА «Ресурс-П»

Наименование характеристики	Геотон-Л1	ШМСА-ВР	ШМСА-СР	ГСА
Ширина полосы обзора, км	950	950	950	950
Ширина полосы захвата, км	38	97	441	25
Разрешение в панхром. режиме, м	1	12	60	
Разрешение в мультиспектр. режиме, м	3-4	23,8	120	25-30
Спектральное разрешение, нм				1,5-10
Спектральные диапазоны (панхр.), мкм	0,58-0,8	0,43-0,90	0,43-0,70	
Спектральные диапазоны (мульти.), мкм	0,45-0,52 0,52-0,60 0,61-0,68 0,67-0,70 0,70-0,73 0,72-0,80 0,80-0,90	0,43-0,51 0,51-0,58 0,60-0,70 0,70-0,90 0,80-0,90	0,43-0,51 0,51-0,58 0,60-0,70 0,70-0,90 0,80-0,90	0,4-1,1 (96 канал.)
Число одновременно используемых диапазонов	1-5	5	5	
Фокусное расстояние объектива, мм	4000	200	40	
Диаметр входного зрачка, мм	500			
Размер элементов в строке (панхр), мкм	6x6	5x5	5x5	
Размер элементов в строке (мульти), мкм	18x18	10x10	10x10	
Число элементов в строке (панхр), б/р		8160	8160	
Число элементов в строке (мульти), б/р		4080x4	4080x4	

<sup>1</sup> БЗУ – бортовое запоминающее устройство

Основные характеристики КА «Канопус-В» и его целевой аппаратуры представлены в таблицах 1.7 и 1.8.

Таблица 1.7 – Основные параметры КА «Канопус-В»

Наименование характеристики	Ед. изм.	№ 1
Масса КА (с полезной нагрузкой)	кг	465
Масса служебной платформы	кг	117
Масса полезной нагрузки	кг	106
Высота орбиты	км	510
Наклонение	град	97,4
Время восходящего узла	ч:мин	11:30
Остаток САС	мес.	19
Периодичность	сут.	3-16
Отклонение оси визирования по крену	град	-40 до +40
Отклонение оси визирования по тангажу	град	-40 до +40
Точность ориентации	угл.мин	5
Точность стабилизации	град/с	0,001
Время перенацеливания оси визирования	мин	2
Мощность солнечных батарей	кВт	0,3 (до 0,68)
Погрешность координатной привязки снимка ОЭА в надир без опорных точек	м	<100
Информационный поток при съемке в надир	Мбит/с	385
Объем БЗУ	Гбайт	24

Таблица 1.8 – Характеристики сенсоров КА «Канопус-В»

Наименование характеристики	ПСС	МСС
Ширина полосы обзора, км	920	920
Ширина полосы захвата, км	23	20
Разрешение в панхром. режиме, м	2,5	
Разрешение в мультиспектр. режиме, м		12
Спектральное разрешение, нм		
Спектральный диапазон (панхр.), мкм	0,54-0,86	
Спектральные диапазоны (мульти.), мкм		0,46-0,52 0,51-0,60 0,63-0,69 0,75-0,84
Информационный поток при съемке в надир, Мбит/с	$\leq 180$	

Основные характеристики КА «Метеор-М» и его целевой аппаратуры представлены в таблицах 1.9 и 1.10.

Таблица 1.9 – Основные параметры КА «Метеор-М»

Наименование характеристики	Ед. изм.	№ 1	№ 2
Масса КА	кг	2700	2900
Масса полезной нагрузки	кг	320	1250
Высота орбиты, средняя	км	832	832
Наклонение	град	98,85	98,77
Периодичность	сут.	5	5
Отклонение оси визирования по крену	град	-39 до +39	-39 до +39
СКО ориентации по оси X	угл.мин	≤ 10	≤ 10
СКО ориентации по оси Y	угл.мин	≤ 10	≤ 10
СКО ориентации по оси Z	угл.мин	≤ 15	≤ 15
Мощность солнечных батарей	кВт	≤ 1,35	1,4 (до 2)
Объем БЗУ	Гбайт		

Таблица 1.10 – Характеристики сенсоров КА «Метеор-М»

Наименование характеристики	КМСС		МСУ-МР	БРЛК	МТВЗА-ГЯ	ИКФС-2*
	МСУ-50	МСУ-100				
Ширина полосы обзора, км			2800		1500	
Ширина полосы захвата, км	900	900	2800	≥ 600		
Пространственное разрешение, км	0,12	0,06	1	0,8-1,3 0,4-0,5	1,5-7верт 16-198гор	≤ 35
Спектральные диапазоны (мульти.), мкм	0,37-0,45 0,45-0,51 0,58-0,69	0,535-0,575 0,63-0,68 0,76-0,9	0,5-0,7 0,7-1,1 1,6-1,8 3,5-4,1 10,5-11,1 11,5-12,5		10,6-183,31ГГц	5-15
Число одновременно используемых диапазонов	3	3	6		29	
Несущая частота зондирующего сигнала, МГц				9623,125±1,25		
Скорость потока информации на выходе, Кбит/с			80	≤ 10000		≤ 580

\*-только для Метеор-М №2

Основные характеристики КА «Электро-Л» и его целевой аппаратуры представлены в таблицах \*11. и 1.12.

Таблица 1.11 – Основные параметры КА «Электро-Л»

Наименование характеристики	Ед. изм.	№ 1	№ 2
Дата запуска		20.01.2011	11.12.2015
Масса КА	кг	1740	
Масса полезной нагрузки	кг	462	
Высота орбиты, средняя	км	36600	
Наклонение	град	0,5	0,5
Эксцентриситет	б/р	0	0
Долгота точки стояния	град	76	77,8
Остаток САС	мес.	61	108
Периодичность съемки штатно/экстренно	час.	0,5/0,25	0,5/0,25
Точность поддержания в точке стояния по долготе	град	≤ 0,5	≤ 0,5
Точность поддержания в точке стояния по широте	град	≤ 0,5	≤ 0,5
Средняя производительность съемки в мультиспектральном режиме	км <sup>2</sup> /сут	?	?
Мощность солнечных батарей	кВт	?	?
Запас характеристической скорости	м/с	?	?
С.к.о. координатной привязки снимка ОЭА в надир без опорных точек	м	?	?
Объем БЗУ	Гбайт		

Таблица 1.12 – Характеристики сенсоров КА «Электро-Л»

Наименование характеристики	МСУ-ГС	ГГАК-Э	БРТК
Разрешение в надире в видимом диапазоне, м	1000		
Разрешение в надире в инфракрасном диапазоне, м	4000		
Спектральное разрешение, нм			
Спектральные диапазоны (видимые), мкм	0,46-0,70		
Спектральные диапазоны (инфракрасные), мкм	0,60-0,70 10,50-12,50		
Число одновременно используемых диапазонов	3(видим.) 7(инфракр.)		
Скорость передачи данных, Мбит/с			≤ 30,72

Для решения проблемы повышения качества получаемой гидрометеорологической информации в арктическом регионе в настоящее время предлагается концепция создания спутниковых систем на эллиптических орбитах с эксцентриситетом порядка 0.15–0.7 и наклонением ~64.8°. Которые обеспечивают круглосуточный всепогодный мониторинг заданных районов, например, территории Российской Федерации и морей Северного Ледовитого океана, а также

постоянную и надежную связь и другие телекоммуникационные услуги. Основу этой системы составят КА серии «Арктика» [2]. Наиболее рациональной для КА «Арктика» является высокоэллиптическая орбита типа «Молния» с высотой апогея - 40000 км, высотой перигея-1000 км, наклоном  $-63^\circ$  и периодом обращения -12 ч. [85]. Эта орбита не только обеспечивает требуемый обзор северной территории, но и дает возможность применения существующих многозональных сканирующих устройств с геостационарных гидрометеорологических спутников «Электро-Л» с незначительными усовершенствованиями, а также достаточный срок активного существования (~7 лет) [2].

Таким образом, при построении математических моделей КА ОГ ДЗЗ необходимо обобщить особенности следующих типов орбит:

- низкие, близких к круговым, с высотой 400~1000 км (КА типа «Ресурс», Канопус и др.);
- высоких круговые и геостационарные (КА типа «Электро»);
- эллиптические (перспективные КА типа «Арктика»).

### **1.2.2 Наземная космическая инфраструктура**

В состав наземной космической инфраструктуры (НКИ) входят оператор системы, 10 действующих и 5 строящихся ППИ, расположенных на территории РФ (рисунок 1.4) и различающихся своими функциональными возможностями.

Оперативное управление работой орбитальной группировки и наземной инфраструктуры осуществляет Научный центр оперативного мониторинга Земли АО «Российские космические системы» (НЦ ОМЗ АО РКС).



Рисунок 1.4 – Схема размещения центров и каналов связи наземной инфраструктуры

Пункты приема информации (ППИ) представляют собой совокупность аппаратно-программных комплексов и персонала, включающую в базовом варианте антенную и приемно-регистрирующую подсистемы, рабочие станции управления с соответствующим ПО и штат операторов. Они обеспечивают прием и демодуляцию информации с КА системы, привязку информации к наземному времени, кадровую синхронизацию, оперативный просмотр принимаемой информации и ее регистрацию в темпе поступления. К характеристиками каждого ППИ относятся:

- условное обозначение;
- диаметр антенны, м
- частота приема, ГГц / Диапазон частот
- общая скорость приема, Мбит/с
- скорость по азимуту, град/с
- скорость по углу места, град/с
- объем памяти накопителя, Тбайт
- обслуживаемые КА ОГ

В зависимости от комплектации аппаратного и программного обеспечения и уровня профессиональной подготовки операторов возможности  $r$ -го ППИ ( $r = 1, 2, \dots, r^*$ ) могут существенно различаться (таблица 1.13).

Таблица 1.13 – Основные характеристики ППИ

Наименование	Долгота град	Широта град	Выполняемые технологические процессы <sup>*)</sup>
Долгопрудный	37.51440	55.93362	П,ПО,СО,А,К
Железногорск	93.53226	56.25292	П,ПО,СО,А,К, ОК
Калининград	20.50731	54.70739	П
Москва-НЦ ОМЗ	37.61764	55.75581	П,ПО,СО,А,К,ОК,ТО,В
Москва-Планета	37.61764	55.75581	П,ПО,СО,А,К
Москва-ЦОД РКС	37.61764	55.75581	
Мурманск	33.07456	68.96958	П,ПО,СО,А
Новосибирск	82.92043	55.03020	П,ПО,СО,А,К
Обнинск	36.58653	55.11201	П,ПО,СО,А,К
Самара	50.10178	53.19554	П
Хабаровск	135.0719	48.48022	П,ПО,СО,А,К
Циолковский	128.1316	51.78803	ПО,СО,А
Анадырь	64.73482	177.5147	
Анино	36.11833	56.00594	
Дудинка	69.40318	86.19082	
Калязин	37.85508	57.24041	

<sup>\*)</sup> П - прием, ПО - первичная обработка, СО - стандартная обработка, А - архивация, К - каталогизация, ОК - оценка качества, ТО - тематическая обработка, В - выдача

Функциональные возможности центров НКИ представлены в таблице 1.14.

Таблица 1.14 – Функциональные возможности центров НКИ <sup>1)</sup>

№	Расположение	Организация	Статус	Функции										
1	Долгопрудный	НИЦ «Планета»	действует			П	О	А			К			
2	Железногорск	ИСС	действует			П	О	А			К	СБ		
3	Калининград	ОКБ «Факел»	действует			П*	О*							
4	Москва	НЦ ОМЗ	действует	У	Ц	П	О	А			К	СБ	В	
5	Москва	НИЦ «Планета»	действует			П	О	А			К			
6	Москва	ЦОД РКС	действует							Ф				
7	Мурманск	УМЧС	действует			П*	О*							
8	Новосибирск	НИЦ «Планета»	действует			П	О	А			К			
9	Обнинск	НИЦ «Планета»	действует			П	О	А			К			
10	Самара	РКЦ «Прогресс»	действует			П	О	А			К			
11	Хабаровск	НИЦ «Планета»	действует			П	О	А			К			
12	Анадырь	УМЧС	строится			П*	О*							
13	Анино	РКС	строится			П*	О*							В
14	Дудинка	УМЧС	строится			П*	О*							
15	Калязин	ОКБ МЭИ (ЦОД)	строится							Ф				В
16	Циолковский	Восточный	строится			П*								

<sup>1)</sup> Обозначения, принятые в таблице 1.14

- У – Управление НКИ
- Ц – Целевое применение ОГ КА ДЗЗ
- П – Прием и регистрация
- О – Обработка первичная и стандартная
- А – Архив долговременного хранения
- Ф – Федеральный фонд данных
- К – клиентская служба
- СБ – Автоматическое производство стандартных и базовых продуктов
- В – Система сквозного контроля качества ЦА и данных
- \* – Автоматическое управление из Национального центра ДЗЗ

Обмен информацией между центрами НКИ реализуется с использованием сети передачи данных, использующей выделенные каналы разной пропускной способности (таблица 1.15).

Таблица 1.15 – Основные характеристики каналов передачи данных  
(по данным НЦ ОМЗ)

Абонент А	Абонент В	Статус канала	Тип канала	Пропускная способность, Мбит/с
НЦ ОМЗ	Калининград	Действует	Выделенный	50
НЦ ОМЗ	Мурманск	Действует	Выделенный	50
НЦ ОМЗ	Железногорск	Действует	Выделенный	50
НЦ ОМЗ	Самара	Действует	Выделенный	50
НЦ ОМЗ	Анино	Планируется	Выделенный	50
НЦ ОМЗ	Калязин	Планируется	Выделенный	50
НЦ ОМЗ	Циолковский	Действует	Выделенный	50
НЦ ОМЗ	НИЦ «Планета»	Действует	Выделенный	50
НЦ ОМЗ	ЦОД РКС	Планируется	Выделенный	40000 Гбит/с
НЦ ОМЗ	ЦУП (ЦНИИмаш)	Действует	Выделенный	1000 Гбит/с
НИЦ «Планета»	Новосибирск	Действует	Интернет	100
НИЦ «Планета»	Хабаровск	Действует	Интернет	100
НИЦ «Планета»	Обнинск	Действует	Интернет	100
НИЦ «Планета»	Долгопрудный	Действует	Интернет	100
Новосибирск	Дудинка	Планируется	Спутниковый	~40
Железногорск	Дудинка	Планируется	Спутниковый	~40
Циолковский	Анадырь	Планируется	Спутниковый	~40
Хабаровск	Анадырь	Планируется	Спутниковый	~40

Передача принятой информации с КА ДЗЗ на региональных пунктах Росгидромета в НЦ ОМЗ осуществляется посредством выделенного канала связи по FTP протоколу через Европейский центр г. Москва. За 1 сеанс приема данных с «Ресурс-П» принимается 12 Гбайт; за 1 сеанс приема данных с «Канопус-В» принимается 8 Гбайт; за 1 сеанс приема данных с «Метеор-М» принимается 6 Гбайт.

### 1.2.3 Готовые информационные продукты

Данные дистанционного зондирования, принимаемые от КА орбитальной группировки наземным комплексом, представляют собой «сырой» информационный продукт. Для создания готовых информационных продуктов они подвергаются многоуровневой обработке в одном из центров наземной

космической инфраструктуры (НКИ). Вид создаваемого продукта задается в заявке потребителя и зависит от типа задействованных при съемке КА и его бортовой аппаратуры, а также от затребованного уровня обработки (см. Таблицу 1.16) [6]:.

Таблица 1.16 – Международная классификация уровней обработки и представления данных ДЗЗ из космоса

Стандартный уровень	Описание	Формат изображения	Формат метаданных
0	Абсолютно «сырые» данные, содержащие информацию с ПЗС-датчиков в процессе съемки, без каких либо преобразований. Информация может иметь сжатие. Данный уровень является базовым для формирования последующих уровней обработки [6]. Как правило, агентства не распространяют данные этого уровня. Используется исключительно в целях изучения работы съемочных систем	Не определен	Не определен
1A	Включает только радиометрическую коррекцию искажений, вызванных разницей в чувствительности отдельных ПЗС-датчиков сканирующей системы. Никакие геометрические исправления для изображений этого уровня не выполняются, поэтому они остаются практически необработанными или «сырыми». Предоставляются коэффициенты абсолютной радиометрической калибровки. Материалы данного уровня рекомендованы [6] для последующей фотограмметрической обработки строгими методами	RAW, TIFF	CEOS, XML

Стандартный уровень	Описание	Формат изображения	Формат метаданных
1B	<p>Включает радиометрическую коррекцию, как и уровень обработки 1A, а также геометрическую коррекцию систематических ошибок ПЗС-датчиков сканирующей системы, в том числе панорамные искажения, искажения вызванные вращением и кривизной Земли, колебанием высоты орбиты спутника. Применена абсолютная радиометрическая калибровка. Изображения уровня 1B иногда называют «path-oriented». Дополнительно могут быть предоставлены файлы [6], содержащие коэффициенты рационального многочлена (RPC), аппроксимирующие геометрию изображения. Материалы могут быть использованы [6] для фотограмметрической обработки как строгими методами, так и аппроксимационными</p>	RAW, TIFF	CEOS, XML, ASCII
2A	<p>Изображения, как правило, приведены к стандартной картографической проекции без использования наземных опорных точек. Проецирование изображения выполняется на среднюю плоскость или используется глобальная цифровая модель рельефа (DEM) с шагом на местности 1 км. Могут быть предоставлены файлы [6], содержащие коэффициенты рационального многочлена (RPC), аппроксимирующие геометрию изображения</p>	GeoTIFF	XML, ASCII
2B	<p>Изображения уровня 2B (в статье 2A) приведены к стандартной картографической проекции с использованием наземных опорных точек. Проецирование изображения выполняется на среднюю плоскость или используется глобальная цифровая модель рельефа (DEM) с шагом на местности 1 км. Могут быть предоставлены файлы [6], содержащие коэффициенты рационального многочлена (RPC), аппроксимирующие геометрию изображения</p>	GeoTIFF	XML, ASCII

Стандартный уровень	Описание	Формат изображения	Формат метаданных
3А	В отличии от уровня 2В, изображения уровня 3А проецируются в заданную картографическую проекцию путем ортотрансформирования с использованием модели снимка, опорных наземных точек и модели рельефа местности. Полученные изображения являются ортоскорректированными с определенной точностью. Изображения, как правило, нарезаются на стандартные картографические листы	GeoTIFF	XML, ASCII
3В	Уровень 3В подразумевает объединение изображений уровня 3А в единые бесшовные растровые мозаики, покрывающие большие территории [6]	GeoTIFF	XML, ASCII

Оператор системы предлагает следующие виды выходных информационных продуктов [117]:

- синтезированные изображения (стандартные уровни обработки) в цифровом виде и на бумажных носителях;
- цифровые растровые карты различных масштабов;
- карты классификации состояний природных, сельскохозяйственных и техногенных объектов.

Указанные виды продуктов могут создаваться на базе снимков с различных КА орбитальной группировки системы.

### *Продукты по снимкам с КА «Ресурс-П»*

В состав целевой оптико-электронной аппаратуры КА типа «Ресурс-П» входят ОЭА «Геотон», комплексы широкозахватной мультиспектральной аппаратуры КШМСА-ВР (высокого разрешения) и КШМСА-СР (среднего разрешения), а также гиперспектральная аппаратура ГСА.

ОЭА «Геотон» КА «Ресурс-П» позволяет выполнять 4 вида съемки:

- панхроматическая съемка в спектральном диапазоне 0.62-0.79 мкм с разрешением на местности 1м и радиометрическим разрешением 10 или 8

- бит, при этом ширина полосы съемки составляет 32 км; результатом этой съемки является «сырой» панхроматический снимок;
- мультиспектральная съемка в 4-х спектральных диапазонах 0.48-0.53мкм, 0.54-0.59мкм, 0.62-0.68мкм, 0.72-0.80мкм с разрешением на местности 3м и радиометрическим разрешением 10 или 8 бит, при этом ширина полосы съемки составляет 38 км; результатом этой съемки является «сырой» мультиспектральный снимок;
  - съемка в красном диапазоне в 2-х спектральных интервалах 0.66-0.69мкм, 0.70-0.75мкм с разрешением на местности 3м и радиометрическим разрешением 10 или 8 бит, при этом ширина полосы съемки составляет 38 км; результатом этой съемки является «сырой» снимок в красном спектральном диапазоне;
  - съемка в инфракрасном диапазоне в спектральном интервале 0.81-0.88мкм с разрешением на местности 3м и радиометрическим разрешением 10 или 8 бит, при этом ширина полосы съемки составляет 32 км; результатом этой съемки является «сырой» снимок в инфракрасном спектральном диапазоне.

Таблица 1.17 – ОЭА «Геотон» – характеристики стандартных уровней обработки и продуктов по снимкам

Заготовка	Объем файла, Гбайт	Обозначение уровня обработки	Выполняемые операции	Обозначение продукта
			Каталогизация	
			Восстановление информации из архива долговременного хранения	
«Сырой» панхроматический снимок	25	1А	Радиометрическая коррекция Геометрическая коррекция	ПХ-снимок 1А
«Сырой» мультиспектральный снимок	2,5	1А	Радиометрическая коррекция Геометрическая коррекция	МС-снимок 1А

Заготовка	Объем файла, Гбайт	Обозначение уровня обработки	Выполняемые операции	Обозначение продукта
«Сырой» снимок в красном диапазоне	2,5	1А	Радиометрическая коррекция Геометрическая коррекция	К-снимок 1А
«Сырой» снимок в инфракрасном диапазоне	2,5	1А	Радиометрическая коррекция Геометрическая коррекция	ИК-снимок 1А
МС-снимок 1А	7,5	1А1	Цветосинтез по 3 каналам	МС-снимок 1А1
ПХ-снимок 1А	75	2А	Трансформирование в картографическую проекцию	ПХ-снимок 2А
МС-снимок 1А	7,5	2А	Трансформирование в картографическую проекцию	МС-снимок 2А
К-снимок 1А	7,5	2А	Трансформирование в картографическую проекцию	К-снимок 2А
ИК-снимок 1А	7,5	2А	Трансформирование в картографическую проекцию	ИК-снимок 2А
МС-снимок 2А	22,5	2А1	Цветосинтез по 3 каналам	МС-снимок 2А1
ПХ-снимок 1А	75	2В	Ортотрансформирование в картографическую проекцию по опорным точкам заказчика	ПХ-снимок 2В
МС-снимок 1А	7,5	2В	Ортотрансформирование в картографическую проекцию по опорным точкам заказчика	МС-снимок 2В
К-снимок 1А	7,5	2В	Ортотрансформирование в картографическую проекцию по опорным точкам заказчика	К-снимок 2В
ИК-снимок 1А	7,5	2В	Ортотрансформирование в картографическую проекцию по опорным точкам заказчика	ИК-снимок 2В
МС-снимок 2В	22,5	2В1	Цветосинтез по 3 каналам	МС-снимок 2В1
ПХ-снимок 2А		3А	Сведение снимков в мозаику	ПХ-снимок 3А
МС-снимок 2А		3А	Сведение снимков в мозаику	МС-снимок 3А
К-снимок 2А		3А	Сведение снимков в мозаику	К-снимок 3А

Заготовка	Объем файла, Гбайт	Обозначение уровня обработки	Выполняемые операции	Обозначение продукта
ИК-снимок 2А		3А	Сведение снимков в мозаику	ИК-снимок 3А
ПХ-снимок 2В		3В	Сведение снимков в мозаику	ПХ-снимок 3В
МС-снимок 2В		3В	Сведение снимков в мозаику	МС-снимок 3В
К-снимок 2В		3В	Сведение снимков в мозаику	К-снимок 3В
ИК-снимок 2В		3В	Сведение снимков в мозаику	ИК-снимок 3В
ПХ-снимок 2А МС-снимок 2А1	32,5	4А	Комплексирование панхроматического и мультиспектрального снимков одной и той же территории	ПХМС-снимок 4А
ПХ-снимок 2В МС-снимок 2В1	32,5	4В	Комплексирование панхроматического и мультиспектрального снимков одной и той же территории	ПХМС-снимок 4В

Все виды продуктов, указанные в таблице 1.17, поставляются с коэффициентами RPC-полиномов, позволяющими потребителю, проводящему дальнейшую обработку самостоятельно, повысить точность и ускорить процесс обработки.

Снимки с уровнем обработки 2А, 2А1, 3А, 3А1 и 4А имеют с.к.о. плановой привязки не хуже 50 м. Снимки с уровнем обработки 2В, 2В1, 3В, 3В1 и 4В имеют с.к.о. плановой привязки не хуже 5-30 м в зависимости от характера рельефа территории, точности опорной информации и условий выполнения съемки.

ОЭА КШМСА-ВР КА «Ресурс-П» позволяет выполнять 2 вида съемки:

- панхроматическая съемка в спектральном диапазоне 0.43-0.70 мкм с разрешением на местности 12 м и радиометрическим разрешением 10 или 8 бит, при этом ширина полосы съемки составляет 97 км; результатом этой съемки является «сырой» панхроматический снимок;
- мультиспектральная съемка в 5-ти спектральных диапазонах 0.43-0.51мкм, 0.51-0.58мкм, 0.60-0.70мкм, 0.70-0.90мкм, 0.80-0.90мкм с разрешением на местности 24м и радиометрическим разрешением 10 или 8 бит, при этом

ширина полосы съемки составляет 97 км; результатом этой съемки является «сырой» мультиспектральный снимок.

Из всех уровней стандартной обработки для снимков КШМСА-ВР выполняется только комплексирование.

Таблица 1.18 – ОЭА КШМСА-ВР – характеристики стандартных уровней обработки и продуктов по снимкам

Заготовка	Объем файла, Мбайт	Обозначение уровня обработки	Выполняемые операции	Обозначение вида продукта
			Каталогизация	
«Сырой» панхроматический снимок	380	1А	Радиометрическая коррекция Геометрическая коррекция	ПХ-снимок 1А
«Сырой» мультиспектральный снимок	96	1А	Радиометрическая коррекция Геометрическая коррекция	МС-снимок 1А
МС-снимок 1А	480	1А1	Цветосинтез по 5 каналам	МС-снимок 1А1
ПХ-снимок 1А	1140	2А	Трансформирование в картографическую проекцию, СКО плановой привязки не хуже 50м	ПХ-снимок 2А
МС-снимок 1А	288	2А	Трансформирование в картографическую проекцию, СКО плановой привязки не хуже 50м	МС-снимок 2А
МС-снимок 2А	1440	2А1	Цветосинтез по 5 каналам, СКО плановой привязки не хуже 50м	МС-снимок 2А1
ПХ-снимок 1А	1140	2В	Орточтотрансформирование в картографическую проекцию по опорным точкам заказчика, СКО плановой привязки 15-30м	ПХ-снимок 2В
МС-снимок 1А	288	2В	Орточтотрансформирование в картографическую проекцию по опорным точкам заказчика, СКО плановой привязки 25-30м	МС-снимок 2В

Заготовка	Объем файла, Мбайт	Обозначение уровня обработки	Выполняемые операции	Обозначение вида продукта
МС-снимок 2В	1440	2В1	Цветосинтез по 3 каналам	МС-снимок 2В1
ПХ-снимок 2А		3А	Сведение снимков в мозаику	ПХ-снимок 3А
МС-снимок 2А		3А	Сведение снимков в мозаику	МС-снимок 3А
ПХ-снимок 2В		3В	Сведение снимков в мозаику	ПХ-снимок 3В
МС-снимок 2В		3В	Сведение снимков в мозаику	МС-снимок 3В
ПХ-снимок 2А МС-снимок 2А1	2580	4А	Комплексирование панхроматического и мультиспектрального снимков одной и той же территории	ПХМС-снимок 4А
ПХ-снимок 2В МС-снимок 2В1	2580	4В	Комплексирование панхроматического и мультиспектрального снимков одной и той же территории	ПХМС-снимок 4В

Все виды продуктов, указанные в таблице 1.18, поставляются с коэффициентами RPC-полиномов, позволяющими потребителю, проводящему дальнейшую обработку самостоятельно, повысить точность и ускорить процесс обработки.

Снимки с уровнем обработки 2А, 2А1, 3А, 3А1 и 4А имеют с.к.о. плановой привязки не хуже 50 м. Панхроматические снимки с уровнем обработки 2В, 2В1, 3В, 3В1 и 4В имеют с.к.о. плановой привязки не хуже 15-30 м в зависимости от характера рельефа территории, точности опорной информации и условий выполнения съемки. Мультиспектральные снимки с уровнем обработки 2В, 2В1, 3В, 3В1 и 4В имеют с.к.о. плановой привязки не хуже 25-30 м в зависимости от характера рельефа территории, точности опорной информации и условий выполнения съемки.

ОЭА КШМСА-СР КА «Ресурс-П» позволяет выполнять 2 вида съемки:

- панхроматическая съемка в спектральном диапазоне 0.43-0.70 мкм с разрешением на местности 60 м и радиометрическим разрешением 10 или

- 8 бит, при этом ширина полосы съемки составляет 440 км; результатом этой съемки является «сырой» панхроматический снимок;
- мультиспектральная съемка в 5-ти спектральных диапазонах 0.43-0.51мкм, 0.51-0.58мкм, 0.60-0.70мкм, 0.70-0.90мкм, 0.80-0.90мкм с разрешением на местности 24м и радиометрическим разрешением 10 или 8 бит, при этом ширина полосы съемки составляет 440 км; результатом этой съемки является «сырой» мультиспектральный снимок.

Из всех уровней стандартной обработки для снимков КШМСА-СР выполняется только комплексирование.

Таблица 1.19 – ОЭА КШМСА-СР – характеристики стандартных уровней обработки и продуктов по снимкам

Заготовка	Объем файла, Мбайт	Обозначение уровня обработки	Выполняемые операции	Обозначение вида продукта
			Каталогизация	
«Сырой» панхроматический снимок	350	1А	Радиометрическая коррекция Геометрическая коррекция	ПХ-снимок 1А
«Сырой» мультиспектральный снимок	90	1А	Радиометрическая коррекция Геометрическая коррекция	МС-снимок 1А
МС-снимок 1А	450	1А1	Цветосинтез по 5 каналам	МС-снимок 1А1
ПХ-снимок 1А	1050	2А	Трансформирование в картографическую проекцию, СКО плановой привязки не хуже 100м	ПХ-снимок 2А
МС-снимок 1А	270	2А	Трансформирование в картографическую проекцию, СКО плановой привязки не хуже 200м	МС-снимок 2А
МС-снимок 2А	1350	2А1	Цветосинтез по 5 каналам, СКО плановой привязки не хуже 200м	МС-снимок 2А1
ПХ-снимок 1А	1050	2В	Ортотрансформирование в картографическую проекцию по опорным точкам заказчика, СКО	ПХ-снимок 2В

Заготовка	Объем файла, Мбайт	Обозначение уровня обработки	Выполняемые операции	Обозначение вида продукта
			плановой привязки 50-80м	
МС-снимок 1А	270	2В	Ортогональное трансформирование в картографическую проекцию по опорным точкам заказчика, СКО плановой привязки 120-150м	МС-снимок 2В
МС-снимок 2В	1350	2В1	Цветосинтез по 5 каналам, СКО плановой привязки 120-150м	МС-снимок 2В1
ПХ-снимок 2А		3А	Сведение снимков в мозаику, СКО плановой привязки не хуже 100м	ПХ-снимок 3А
ПХ-снимок 2В		3В	Сведение снимков в мозаику, СКО плановой привязки 50-80м	ПХ-снимок 3В
ПХ-снимок 2А МС-снимок 2А1	2400	4А	Комплексирование панхроматического и мультиспектрального снимков одной и той же территории, СКО плановой привязки не хуже 100м	ПХМС-снимок 4А
ПХ-снимок 2В МС-снимок 2В1	2400	4В	Комплексирование панхроматического и мультиспектрального снимков одной и той же территории, СКО плановой привязки 50-80м	ПХМС-снимок 4В

Все виды панхроматических снимков, указанные в таблице 1.19, поставляются с коэффициентами RPC-полиномов, позволяющими потребителю, проводящему дальнейшую обработку самостоятельно, повысить точность и ускорить процесс обработки.

Панхроматические снимки с уровнем обработки 2А, 3А и 4А имеют с.к.о. плановой привязки не хуже 100 м, мультиспектральные - не хуже 200м. Панхроматические снимки с уровнем обработки 2В, 3В и 4В имеют с.к.о. плановой привязки не хуже 50-80 м в зависимости от характера рельефа территории, точности опорной информации и условий выполнения съемки.

Мультиспектральные снимки с уровнем обработки 2В, 2В1 имеют с.к.о. плановой привязки не хуже 120-150 м в зависимости от характера рельефа территории, точности опорной информации и условий выполнения съемки.

Аппаратура ГСА КА «Ресурс-П» позволяет выполнять 1 вид съемки:

- гиперспектральная съемка в спектральном диапазоне 0.4-1.1мкм (96-130 каналов) с разрешением на местности 30м и радиометрическим разрешением 14 бит, при этом ширина полосы съемки составляет 25 км; результатом этой съемки является «сырой» гиперспектральный снимок.

Таблица 1.20 – Аппаратура ГСА – характеристики стандартных уровней обработки и продуктов по снимкам

Заготовка	Объем файла, Гбайт	Обозначение уровня обработки	Выполняемые операции	Обозначение типа продукта
			Каталогизация	
«Сырой» гиперспектральный снимок	2	1А	Радиометрическая коррекция Геометрическая коррекция	ГС-снимок 1А
ГС-снимок 1А	6	2А	Ортогональное трансформирование в картографическую проекцию, СКМ плановой привязки не хуже 100м	ГС-снимок 2А
ГС-снимок 1А	6	2В	Пересчет яркостей в физические величины на входном зрачке ГСА Ортогональное трансформирование в картографическую проекцию по опорным точкам заказчика, СКМ плановой привязки 30-50м	ГС-снимок 2В

Гиперспектральные снимки уровней обработки 1А и 2А, указанные в таблице 1.20, поставляются с коэффициентами RPC-полиномов.

***Продукты по снимкам с КА «Канопус-В»***

В состав целевой аппаратура КА «Канопус-В» входят панхроматическая съемочная система ПСС и многозональная съемочная система МСС. Целевая аппаратура КА «Канопус-В» позволяет выполнять 2 вида съемки:

- панхроматическая съемка в спектральном диапазоне 0.54-0.86 мкм с разрешением на местности 2.7м и радиометрическим разрешением 8 бит, при этом ширина полосы съемки составляет 23 км; результатом этой съемки является «сырой» панхроматический снимок;
- мультиспектральная съемка в 4-х спектральных диапазонах 0.46-0.52мкм, 0.51-0.60мкм, 0.63-0.69мкм, 0.75-0.84мкм с разрешением на местности 12м и радиометрическим разрешением 8 бит, при этом ширина полосы съемки составляет 20 км; результатом этой съемки является «сырой» мультиспектральный снимок.

Таблица 1.21 – «Канопус-В» – характеристики стандартных уровней обработки и продуктов по снимкам

<b>Заготовка</b>	<b>Объем файла, Гбайт</b>	<b>Обозначение уровня обработки</b>	<b>Выполняемые операции</b>	<b>Обозначение типа продукта</b>
Каталогизация				
Восстановление информации из архива долговременного хранения				
«Сырой» панхроматический снимок	1	1А	Радиометрическая коррекция Геометрическая коррекция	ПХ-снимок 1А
«Сырой» мультиспектральный снимок	0,17	1А	Радиометрическая коррекция Геометрическая коррекция	МС-снимок 1А
ПХ-снимок 1А	8,8	2А	Сшивка микрокадров Трансформирование в картографическую проекцию	ПХ-снимок 2А
МС-снимок 1А	0,331-СПК=1, 3	2А	Покаанальная сшивка микрокадров	МС-снимок 2А

Заготовка	Объем файла, Гбайт	Обозначение уровня обработки	Выполняемые операции	Обозначение типа продукта
	Все СПК		Трансформирование в картографическую проекцию	
МС-снимок 2А	1,3	2А1	Цветосинтез по 4 каналам	МС-снимок 2А1
ПХ-снимок 1А	8,8	2В	Сшивка микрокадров Ортотрансформирование в картографическую проекцию по опорным точкам заказчика	ПХ-снимок 2В
МС-снимок 1А	0,331-СПК=1,3 Все СПК	2В	Поканальная сшивка микрокадров Ортотрансформирование в картографическую проекцию по опорным точкам заказчика	МС-снимок 2В
МС-снимок 2В	1,3	2В1	Цветосинтез по 4 каналам	МС-снимок 2В1
ПХ-снимок 2А		3А	Сведение снимков одной и той же территории в мозаику	ПХ-снимок 3А
ПХ-снимок 2В		3В	Сведение снимков одной и той же территории в мозаику	ПХ-снимок 3В
ПХ-снимок 2А МС-снимок 2А1	32	4А	Комплексирование панхроматического и мультиспектрального снимков одной и той же территории, СКО плановой привязки не хуже 50м	ПХ-снимок 4А
ПХ-снимок 2В МС-снимок 2В1	32	4В	Комплексирование панхроматического и мультиспектрального снимков одной и той же территории, СКО плановой привязки 10-30м	ПХ-снимок 4В

Все виды продуктов, указанные в таблице 1.21, поставляются с коэффициентами RPC-полиномов, позволяющими потребителю, проводящему дальнейшую обработку самостоятельно, повысить точность и ускорить процесс обработки.

Снимки с уровнем обработки 2А, 2А1, 3А, 3А1 и 4А имеют с.к.о. плановой привязки не хуже 50 м. Снимки с уровнем обработки 2В, 2В1, 3В, 3В1 и 4В имеют с.к.о. плановой привязки не хуже 5-30 м в зависимости от характера рельефа территории, точности опорной информации и условий выполнения съемки.

Как видно из таблиц 1.17 – 1.21, общее число видов стандартных продуктов, получаемых только по информации с КА «Ресурс-П» и «Канопус-В» и различающихся разрешением на местности, радиометрическим разрешением, используемыми спектральными диапазонами и уровнями обработки, достигает 68-ми.

#### **1.2.4 Потребители**

Потребители формируют заявки к системе, каждый со своими требованиями и частотой. Заявки разных потребителей образуют входящий поток заявок системы, который является нерегулярным и ординарным. Каждый потребитель характеризуется своей предысторией: числом предыдущих заявок, их суммарным объемом и интенсивностью. Любому потребителю, подавшему хотя бы одну заявку, присваивается уникальный идентификатор.

В зависимости от типа и предыстории множество всех потребителей системы разбито на 5 подмножеств:

- федеральные;
- региональные;
- муниципальные;
- корпоративные;
- частные.

Принадлежность потребителя к тому или иному подмножеству может быть использована для назначения приоритета заявке, исходящей от данного потребителя.

Помимо предыстории потребитель характеризуется наличием или отсутствием действующих юридически оформленных договорных отношений, текущей платежеспособностью и уровнем лояльности. Соответствующие

параметры и данные из предыстории используются для входного контроля заявок перед регистрацией и ранжирования потребителей по важности.

В сфере информационных технологий формальный договор между заказчиком услуги и её поставщиком, содержащий описание услуги, права и обязанности сторон и согласованный уровень качества предоставления данной услуги может быть формализован в виде соглашения об уровне обслуживания (англ. Service Level Agreement – SLA). В рамках рассматриваемой системы соглашения об уровне обслуживания должно содержать (рисунок 1.5):

- описание сервисов системы, которые предоставляются потребителю по данному соглашению об уровне обслуживания;
- описание условий предоставления сервисов, вплоть до порядка работы с заявкой на предоставление конкретных сервисов;
- измеримые параметры качества сервисов, в качестве которых могут выступать объем обработанной информации и сроки ее предоставления, время устранения инцидентов и т.п.



Рисунок 1.5 – Соглашение об уровне обслуживания потребителя

Характеристики потребителей системы (пример) с точки зрения формирования соглашения об уровне обслуживания представлены в таблице 1.22.

Таблица 1.22 – Характеристики потребителей системы (пример)

Наименование организации	Тип	Широта град	Долгота град	Число заявок в 2016г.	Общая заявлен. площадь, тыс кв.км	Частота подачи заявок, сут <sup>-1</sup>
<b>Государственная корпорация по космической деятельности «Роскосмос»</b>						
Департамент автоматических космических комплексов и систем	Федер.	55.7558	37.6176	128	10 531	0,35
НЦ ОМЗ	Федер.	55.7558	37.6176	329	131 578	0,90
АО РКЦ «Прогресс»	Корпор.	53.1955	50.1018	20	54 710	0,05
АО «НИИТП»	Корпор.	55.7558	37.6176	18	56 661	0,04
АО «Корпорация «ВНИИЭМ»	Корпор.	55.7558	37.6176	3	499	0,008
<b>Министерство по чрезвычайным ситуациям</b>						
Национальный центр управления в кризисных ситуациях	Федер.	55.7558	37.6176	250	25 020	0,68
МЧС России по республике Татарстан	Регион.	55.7986	49.1063	3	275	0,008
<b>Министерство природных ресурсов</b>						
Дальневосточный центр ФГБУ «НИЦ Планета»	Федер.	43.1151	131.8853	201	1153	0,55
Сибирский центр ФГБУ «НИЦ Планета»	Федер.	55.0302	82.9204	82	5 707	0,22
ФГБУ «НИЦ Планета»	Федер.	55.7558	37.6176	93	383 906	0,25
ФГБУ «Рослесинфорг»	Федер.	55.7558	37.6176	100	13 485	0,27
ФБУ «Рослесозащита», Пушкино, МО	Федер.	56.0104	37.8472	37	15 545	0,101
ФГБУ «Информационно-аналитический центр развития водохозяйственного комплекса»	Федер.	55.7558	37.6176	4	3 247	0,01
ФГБУ «Национальный парк «Нижняя Кама», Елабуга	Федер.	55.7566	52.0544	2	2,1	0,005
<b>Министерство экономического развития РФ</b>						
АО «НИИП центр «Природа»	Корпор.	55.7558	37.6176	15	17 060	0,04
<b>Администрации городов и регионов</b>						
Правительство Архангельской области	Регион.	64.5394	40.5169	3	2 570	0,008
Министерство сельского хозяйства Амурской области	Регион.	50.2906	127.527	2	1 098	0,005
Агентство по развитию связи и массовых коммуникаций Калининградской области	Регион.	54.7074	20.5073	3	0,3	0,008
Агентство по информации и связи Камчатского края	Регион.	46.9592	142.738	5	1 197	0,013
Кировское ОГБУ «Центр информационных технологий»	Регион.	58.6036	49.6679	2	267	0,005
<b>Федеральное агентство научных организаций РФ</b>						

Наименование организации	Тип	Широта град	Долгота град	Число заявок в 2016г.	Общая заявлен. площадь, тыс кв.км	Частота подачи заявок, сут <sup>-1</sup>
Дальневосточное отделение РАН	Федер.	43.1151	131.8853	3	736	0,008
Институт географии РАН	Федер.	55.7558	37.6176	6	1 767	0,016
Институт космических исследований РАН	Федер.	55.7558	37.6176	3	1 821	0,008
ФГБУН «Южный научный центр РАН»	Федер.	47.2225	39.7187	9	518	0,024
Министерство науки и высшего образования РФ						
НИИ «АЭРОКОСМОС»	Федер.	55.7558	37.6176	1	47,2	0,002
Организации зарубежных стран						
Canadian Space Agency, Квебек	Част.	46.8127	-71.2193	5	23,8	0,013
Centre nationale detudes spatiales, Тулуза	Част.	43.5918	1.44204	4	41,2	0,01
ISRO, Дели	Част.	28.6343	77.2169	2	39,4	0,005
Japan Aerospace Exploration Agency	Част.	36.6533	137.981	2	215,4	0,005
U.S. Geological Survey	Част.	38.9596	-77.3545	9	1 073	0,024
УП «Геоинформационные системы» Национальной академии Беларуси	Корпор.	53.9022	27.5618	127	718,6	0,34

### 1.2.5 Заявки

Заявки в систему поступают последовательно. Каждая заявка, поступающая на вход системы, регистрируется с записью даты и времени поступления с присвоением ей индивидуального номера.

При формировании заявки потребителем задаются следующие атрибуты:

- государственная принадлежность, наименование заказчика и его контактные данные;
- конечный потребитель;
- цель использования информации;
- наименование района (или нескольких районов) для съемки с указанием в системе координат WGS-84 широты и долготы вершин полигонального(ых) района(ов) съемки;
- тип платформы-носителя целевой аппаратуры;
- состав аппаратуры, спектральные диапазоны;

- интервал дат съемки;
- периодичность съемки;
- диапазон допустимых углов Солнца;
- угол визирования;
- максимальная допустимая доля района, закрытая облачностью;
- приоритет районов (если их несколько);
- радиометрическое разрешение;
- код уровня обработки;
- система координат выходного изображения;
- максимальный размер обработанного файла;
- формат записи;
- способ передачи конечного продукта.

Текущее состояние  $j$ -ой заявки, поставленной на обслуживание, описывается переменной  $s_j$ , значение которой меняется системой в момент совершения одного из следующих событий:

- заявка зарегистрирована (0);
- циклограмма готова (1);
- циклограмма в БЗУ (2);
- снимок в БЗУ (3);
- снимок в ППИ (4);
- продукт в ППИ (5);
- продукт в архиве (6);
- продукт у потребителя (7).

Множество поступающих заявок разделяется на группы, имеющие разные приоритеты: 0-экстренные, 1-срочные, 2-важные, 3-обычные, 4-фоновые и 5-прочие. Статистические данные по числу заявленных на съемку и отснятых районов и распределения заявок по группам приоритета представлены в таблицах 1.23 и 1.24 (по данным НЦ ОМЗ).

Таблица 1.23 – Обработки заявок на данные ДЗЗ в 2015 году

Приоритет заявок	Кол-во заявок		Снято хотя бы 1 раз		Полное покрытие		Не снято	
	шт.	%	шт.	%	шт.	%	шт.	%
0, экстренные	610	0,8	283	46,4	83	13,6	327	53,6
1, срочные	18 211	25,4	3 713	20,4	785	4,3	14 498	79,6
2, важные	11 196	15,6	5 044	45,1	1 805	16,1	6 152	54,9
3, обычные	29 858	41,6	7 593	25,4	268	0,9	22 265	74,6
4, фоновые	11 443	15,9	3 441	30,1	255	2,2	8 002	69,9
5, прочие	484	0,7	166	34,3	6	1,2	318	65,7
ВСЕГО	71 802	100,0	20 240	28,2	3 202	4,5	51 562	71,8

Таблица 1.24 – Обработки заявок на данные ДЗЗ в 2016 году

Приоритет заявок	Кол-во заявок		Снято хотя бы 1 раз		Полное покрытие		Не снято	
	шт.	%	шт.	%	шт.	%	шт.	%
0, экстренные	2 066	2,6	1 509	73,0	720	34,8	557	27,0
1, срочные	10 656	13,2	4 187	39,3	678	6,4	6 469	60,7
2, важные	12 624	15,6	3 800	30,1	805	6,4	8 824	69,9
3, обычные	33 724	41,7	7 617	22,6	703	2,1	26 107	77,4
4, фоновые	21 856	27,0	4 470	20,5	617	2,8	17 386	79,5
5, прочие	23	0,0	14	60,9	0	0,0	9	39,1
ВСЕГО	80 949	100,0	21 597	26,7	3 523	4,4	59 352	73,3

Данные, приведенные в таблицах 1.23 и 1.24, обозначают следующие ключевые тенденции, необходимые для учета при дальнейшем развитии системы ДЗЗ как информационной системы:

- спрос на данные ДЗЗ растет (общее число заявок увеличилось на 13%);
- распределение заявок по приоритетам меняется незначительно, пик приходится на «обычные» заявки (рисунок 1.6);
- значительное превышение доли заявок, снятых хотя бы один раз, над долей заявок, выполненных полностью, свидетельствует о том, что проблемным является выполнение с одинаковым качеством заявок на периодическую съемку;
- доля необслуженных заявок весьма велика и может достигать до 80% в отдельных группах заявок.

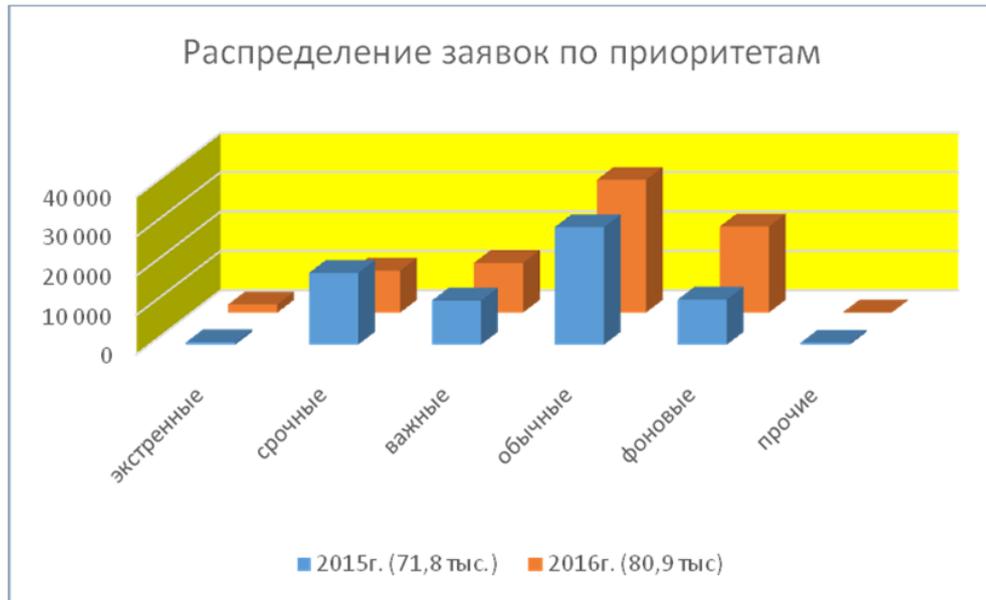


Рисунок 1.6 – Распределение заявок по приоритетам в 2015 и 2016 г.г.

(по данным НЦ ОМЗ)

Преобладание «обычных» и значительная доля необслуженных заявок свидетельствуют о том, что при текущее распределение потоков целевой информации при функционировании космической системы ДЗЗ требует значительного улучшения.

Если рассмотреть распределение заявок со стороны федеральных органов исполнительной власти (ФОИВ) по космическим аппаратам, то и здесь имеется некоторый перекоп в сторону использования одних и тех же КА (таблицы \*25. и 1.26) [100], что, при дальнейшем увеличении интенсивности потока заявок, может привести к неконтролируемому росту отказов в их обслуживании.

Таблица 1.25 – Требования ФОИВ к данным ДЗЗ – Минприроды, Минприроды, Росреестр, Минэнерго, МЧС, Минрегионразвития, Рослесхоз

Основные решаемые задачи	Тип КА	Разрешение, м	Периодичность; раз/сутки
мониторинг состояния недр, контроль экологической обстановки в районах добычи полезных ископаемых	Ресурс-П; Ресурс-ПМ	0,3-5	1-2 недели
анализ и прогноз состояния акваторий морей и океанов (ледовая разведка, температура поверхности океана, ветер, волнение, пленки нефтепродуктов, морская биология и др.)	Канопус-В	0,3-15	1-4 суток
создание и обновление топографических карт масштаба 1:10 000 определение зон с особыми условиями использования территорий, выявление несанкционированных застроек, определение границ земельных участков, на которых расположены объекты федерального значения, объекты регионального значения, объекты местного значения	Ресурс-П; Ресурс-ПМ	0,3-1	1-2 недели
ведение государственного топографического мониторинга в обзорном режиме	Канопус-В	5-10	1 р/год
мониторинг строительства объектов электроэнергетики	Ресурс-П; Ресурс-ПМ	0,3-1	2 р/год
мониторинг аварийных разливов нефтепродуктов	Канопус-В	1-50	1-2
выявление обстановки в районе аварий и катастроф на транспорте и потенциально опасных объектах	Ресурс-ПМ Канопус-В	0,3-30	0,25-12 часов
геологическое картирование	Канопус-В	5-15	1 месяц
мониторинг гидрологических опасных явлений (подъем воды, заторы, наводнения и затопления) ; контроль динамики лесных пожаров	Ресурс-ПМ Канопус-В	0,3-30	0,25-12 часов

Таблица 1.26 – Требования ФОИВ к данным ДЗЗ – Росгидромет, Минприроды, МЧС и др.

Основные решаемые задачи	Тип КА	Разрешение, км	Периодичность; раз/сутки
получение изображений облачности и подстилающей поверхности в видимом и ИК-диапазонах: - синоптический прогноз погоды; - штормовое и градовое предупреждение.	Метеор Электро	0,1-4	2-6 0.1-0.5 ч (для ГСО)
измерение температурно-влажностных и ветровых высотных профилей атмосферы (обеспечение численных прогнозов погоды).	Метеор Электро	гор. 15-50 верт. 1-3	2-6
мониторинг ОКП и солнечной активности	Метеор Электро	100-500	2-6
сбор и ретрансляция данных с наземных платформ и морских буев: - получение истинных характеристик поверхности для решения целевых задач, калибровки и валидации.	Метеор Арктика	Коорд. привязка данных - 5-10	2-4
мониторинг биопродуктивности Мирового океана: - обнаружение апвеллинга и выявление новых районов промысла морепродуктов.	Метеор Океан	0.1-5 (откр. акват.); 0.01-0.1 (прибр. зоны)	1-2 раза в неделю
мониторинг приводного ветра, штормовых зон и ледовой обстановки: - определение скорости и направления ветра; - мониторинг спектра волн.	Метеор Океан	50-200 м	4-8 (по зонам ЧС)
мониторинг температуры и солёности поверхности Мирового океана: - мониторинг разлива нефти и тепловых загрязнений.	Метеор Океан	15-50	1-2 раза в неделю

Входной поток заявок проявляется в виде последовательности входящих сообщений на сайте оператора системы. Оператор системы выполняет обработку поступившей заявки в соответствии с установленной дисциплиной обслуживания.

Для удовлетворения произвольной заявки оператор системы располагает несколькими возможностями (каналами обслуживания): поиск и извлечение

подходящих готовых снимков из архивов, размещенных в подчиненных оператору хранилищах, а также проведение съемки с использованием целевой аппаратуры, расположенной на платформах-носителях четырех типов.

Алгоритм обработки заявки включает последовательное выполнение оператором ряда процедур:

- 1) если интервал дат съемки, указанный в заявке, позволяет, то - поиск подходящего архивного снимка;
- 2) если архивный снимок найден, то переход к процедуре обработки снимка;
- 3) если подходящий архивный снимок отсутствует, то - определение нужного канала обслуживания и постановка заявки во входную очередь данного канала;
- 4) расчет необходимых параметров и добавление запрошенной съемки в циклограмму работы платформы нужного типа;
- 5) выдача управляющих команд на борт для исполнения циклограммы съемки заданного района;
- 6) расчет необходимых параметров и добавление сеанса связи в циклограмму работы подходящего ППИ;
- 7) определение наземных ППИ, способных осуществить обработку снимка до затребованного уровня обработки;
- 8) выбор ППИ-обработчика в соответствии с решающим правилом и добавление, при необходимости, соответствующего задания в циклограмму работы этого ППИ;
- 9) передача, при необходимости, снимка от ППИ-приемника к ППИ-обработчику;
- 10) если в качестве обработчика определен оператор системы, то выполнение обработки снимка до заказанного потребителем уровня;
- 11) определение маршрута передачи и передача готового продукта потребителю.

Для принятия решений при выполнении процедур 7) и 8) оператор системы использует установленную заранее политику распределения вычислительных ресурсов, которая определяет совокупность запретов и приоритетов на получение, хранение и выдачу информации потребителям. Учитывая тот факт, что обработка снимков и создание тематического продукта может включать несколько весьма трудоемких и длительных автоматизированных процедур, выполняемых с участием человека-оператора, то существенным недостатком данного алгоритма является:

- обработка результатов съемки производится на одном из ППИ;
- выбор ППИ для создания тематического продукта потребителю носит как правило директивный характер;
- при создании тематического продукта не учитываются возможности других территориально-распределенных ППИ, например их текущая загруженность и разница во времени.

Внесение изменения в алгоритм обработки заявки за счет оптимизации распределение потоков целевой информации по элементам космической системы ДЗЗ должно:

- повысить надежность обработки;
- повысить уровень автоматизации обработки заявок;
- снизить количество отказов в обслуживании;
- осуществить прогноз возможных отказов в обслуживании с указанием «узких» мест в элементах космической системы ДЗЗ.

### **1.2.6 Циклограммы**

Последовательность команд, составляющая циклограмму, определяет моменты включения/выключения бортовых устройств определенного в заявке КА, реализующего процесс проведения съемки заданного района или съемки группы районов в соответствии с рассчитываемым маршрутом.

Расчет циклограммы выполняется оператором системы по исходным данным, содержащимся в конкретной заявке. Одна циклограмма может

соответствовать одной заявке или нескольким заявкам, относящимся к разным достаточно близким районам съемки.

### ***Описание унифицированного формата циклограммы***

Циклограммы, предназначенные для КА и ППИ, имеют похожий формат.

Общая часть рабочей программы содержит следующие данные:

- Дата и время составления программы (дискретное московское время):  
ууууммдд\_hhmmss
- Тип рабочей программы (для КА – 1 , для ППИ – 2, 3 - 9 – резерв): N
- Номер рабочей программы: NNNNN
- Условный номер космического аппарата, для которого составляется программа/условный номер ППИ, если это программа для ППИ: NNNN
- Название КА /название ППИ: SSSSSSSSS
- Временной интервал планирования (начало - конец): ууууммдд\_hhmmss-  
ууммдд\_hhmmss
- Витки планирования для КА (для ППИ оставить 0): NNNNN-NNNNN
- Дата и время обновления исходных данных планирования (информация о состоянии ППИ, ЦА, КА и т.д.): ууууммдд\_hhmmss
- Свободный объем БЗУ на начало планирования(Для ППИ – 0):  
NNNNN.NNNNN
- Количество доступной энергии на начало планирования(для ППИ– 0):  
NNNNN.NNNNN
- Стирание ранее переданных в нужном качестве маршрутов:  
delsZZZZZUUUUUNNNNN\_ZZZZZUUUUUNNNNN\_...delf

Часть циклограммы, предназначенная для КА, содержит следующие записи:

- начало рабочей программы: start\_gp
- описание задания, сортировка в порядке увеличения времени и даты начала:
- NNN N YYYYMMDD\_HHMMSS-YYYYMMDD\_HHMMSS sNN.NNNNN  
sNNN.NNNNN           YYYYMMDD\_HHMMSS-YYYYMMDD\_HHMMSS

N.NNNNN NNNSSSS\_NNNSSSS\_NNNSSSS\_..... NNNNN.NNNNN  
 NNNNN.NNNNN ZZZZZUUUUUNNNNN\_ZZZZZUUUUUNNNNN\_....  
 \*SSSSSSSS\* sNNN.NNNNN sNNN.NNNNN sNNN.NNNNN

- номер задания внутри рабочей программы: NNN
- тип задания (1 - съемка, 2 - сброс, 3 - технологический, 4-9 - резерв): N
- начало-конец режима: ууууммдд-\_hhmmss-ууууммдд\_hhmmss
- широта, долгота подспутниковой точки для начала: sNN.NNNNN  
sNNN.NNNNN
- начало-конец режима, без учета подготовительного и заключительного участков и т.д. (то есть реальное время съемки или сброса или технологического): ууууммдд-\_hhmmss-ууууммдд\_hhmmss
- суммарная важность: NNN.NNNNN
- тип аппаратуры и настройки аппаратуры (какая из ЦА или ВРЛ; режим, каналы, ОЭПы, канал передачи данных и т.д.), номер аппаратуры, затем код настройки аппаратуры: NNNSSSS\_NNNSSSS\_NNNSSSS\_.....
- затраты энергии: NNNNN.NNNNN
- затраты памяти (>0 при съемке, <0 при сбросе): NNNNN.NNNNN
- уникальный номер заявки и участка в заявке, который снимается или сбрасывается (Заявка, участок в заявке, часть участка в заявке):  
ZZZZZUUUUUNNNNN\_ZZZZZUUUUUNNNNN\_....
- название места съемки/сброса: \*SSSSSSSS\*
- крен КА(> 0 – это влево, < 0 – это вправо): sNNN.NNNNN
- тангаж КА (>0, если КА "смотрит" вперед, <0 если КА "смотрит" назад):  
sNNN.NNNNN
- рысканье КА (>0 – если КА влево, <0 – если вправо): sNNN.NNNNN
- конец рабочей программы: finish\_gp

Часть циклограммы, предназначенная для ППИ, содержит следующие записи:

- начало рабочей программы: start\_gp

- номер задания внутри рабочей программы: NNN
- тип задания (1 - приём, 2 - технологический, 3-9 - резерв): N
- начало-конец режима: ууууммдд\_hhmmss-ууууммдд\_hhmmss
- начало-конец режима, без учета подготовительного и заключительного участков и т.д. (то есть реальное время приема или технологического): ууууммдд\_hhmmss-ууууммдд\_hhmmss
- суммарная важность приёма: NNN.NNNNN
- принимаемый КА: NNNN
- тип аппаратуры ППИ и настройки аппаратуры (какая из антенн; режим, каналы приёма-передачи и т.д.), номер аппаратуры, затем код настройки аппаратуры: NNSSSSS
- принимаемый объем информации: NNNNN.NNNNN
- уникальный номер заявки и участка в заявке, который принимается (Заявка, участок в заявке, часть участка в заявке): ZZZZZUUUUUNNNNN\_ZZZZZUUUUUNNNNN\_....
- название места съемки: \*SSSSSSSS\*
- начальный угол поворота антенны по углу места: sNNN.NNNNN
- начальный угол поворота антенны по углу горизонта: sNNN.NNNNN
- конец рабочей программы: finish\_gp

Модель бортовых циклограмм - набор векторных функций времени, задающих программы управления задействованной при съемке целевой аппаратурой (сенсорами). Размерность вектора равна числу сенсоров, участвующих в процессе съемки. Каждая координата вектора в момент времени  $t$  равна 1, если сенсор включен, и равна 0, если сенсор выключен.

### 1.2.7 Снимки и маршруты

Снимок представляет собой результат дистанционных измерений интенсивности излучения с подстилающей поверхности заданного в заявке района на двумерной пространственной сетке. Цифровой моделью снимка, сделанного в

некотором спектральном диапазоне, является матрица ( $n \times m$ ), у которой элемент на пересечении  $i$ -й строки и  $j$ -го столбца хранит значение интенсивности излучения от соответствующего элемента ( $R \times R$ ) подстилающей поверхности, где  $R$  – разрешение на местности.

Панхроматический снимок - матрица интенсивностей излучения в достаточно широком диапазоне видимой части спектра из интервала 0,4-0,7 мкм. Мультиспектральный снимок - набор из нескольких матриц одинакового размера, число которых равно числу используемых при съемке узких спектральных диапазонов.

Несколько районов, заданных в одной заявке, или близлежащих, но заданных в других заявках, могут объединяться для съемки в слитный маршрут. При этом отснятый маршрут сохраняется в БЗУ в виде единого файла. Считается, что объем файла пропорционален времени съемки маршрута.

Принятый наземным комплексом маршрут записывается в долговременную память в виде файла определенного формата, в котором размещаются данные измерений (значения элементов матрицы/матриц) и метаданные, фиксирующие время съемки, уникальные номера заявки и снятых районов, идентификаторы КА и сенсора, номера использованных спектральных каналов, данные бортовой автоматической системы навигации о пространственном положении КА во время съемки, необходимые для привязки снимка.

Файл отснятого маршрута является исходной информацией для технологической цепочки последующих процедур обработки, имеющей целью создание указанного в заявке продукта.

В таблице 1.27 приведены некоторые характеристики маршрутов, отснятых различной целевой аппаратурой КА из состава орбитальной группировки.

Таблица 1.27 – Характеристики «сырых» снимков (примеры)

Тип сенсора	Номер заявки	Обозначение формата файла	Объем файла, Гбайт	Спектральные диапазоны	ППИ-приемник	Адрес хранения (URL)
Геотон		TIFF	25	0,58-0,8 мкм.	НЦ ОМЗ	www.ntsomz.ru

Тип сенсора	Номер заявки	Обозначение формата файла	Объем файла, Гбайт	Спектральные диапазоны	ППИ-приемник	Адрес хранения (URL)
		TIFF	2,5 один файл каждого канала	<sup>4</sup> 0,45-0,52мкм; <sup>4</sup> 0,52-0,6мкм; <sup>4</sup> 0,6-0,68мкм; 0,72-0,80мкм.	НЦ ОМЗ	www.ntsomz.ru
		TIFF	2,5 один файл каждого канала	0,8-0,9 мкм.	НЦ ОМЗ	www.ntsomz.ru
		TIFF	2,5 один файл каждого канала	0,7-0,73 мкм; 0,67-0,7 мкм.	НЦ ОМЗ	www.ntsomz.ru
<sup>1</sup> КШМСА-ВР		TIFF	0,37	0,43-0,70мкм;	НЦ ОМЗ	www.ntsomz.ru
		TIFF	0,09 один файл каждого канала	0,43-0,51 мкм; 0,51-0,58 мкм; 0,60-0,70 мкм; 0,70-0,80 мкм; 0,80-0,90 мкм.	НЦ ОМЗ	www.ntsomz.ru
<sup>1</sup> КШМСА-СР		TIFF	0,34	0,43-0,70 мкм;	НЦ ОМЗ	www.ntsomz.ru
		TIFF	0,09 один файл каждого канала	0,43-0,51 мкм; 0,51-0,58 мкм; 0,60-0,70 мкм; 0,70-0,80 мкм; 0,80-0,90 мкм.	НЦ ОМЗ	www.ntsomz.ru
ГСА		TIFF	2	0,4-1,1 (до 256 спектральных каналов)	НЦ ОМЗ	www.ntsomz.ru
		TIFF	2	0,4-1,1 (до 256 спектральных каналов)	НЦ ОМЗ	www.ntsomz.ru
ПСС		RSML	<sup>3</sup> 1,8	0,52-0,85мкм	НЦ ОМЗ	www.ntsomz.ru
		RSML	<sup>3</sup> 1,8	0,52-0,85мкм	НЦ ОМЗ	www.ntsomz.ru
МСС		RSML	<sup>3</sup> 1,8	0,54-0,6мкм; 0,63-0,69мкм; 0,69-0,72мкм; 0,75-0,86 мкм.	НЦ ОМЗ	www.ntsomz.ru
		RSML	<sup>3</sup> 1,8	0,54-0,60 мкм; 0,63-0,69 мкм; 0,69-0,72 мкм; 0,75-0,86 мкм	НЦ ОМЗ	www.ntsomz.ru
МСУ-50		RSML	2,3	0,37-0,45 мкм; 0,45-0,51 мкм; 0,58-0,69 мкм.	НЦ ОМЗ	www.ntsomz.ru
МСУ-100		RSML	2,3	0,535-0,575 мкм;	НЦ ОМЗ	www.ntsomz.ru

Тип сенсора	Номер заявки	Обозначение формата файла	Объем файла, Гбайт	Спектральные диапазоны	ППИ-приемник	Адрес хранения (URL)
				0,63-0,68 мкм; 0,76-0,9 мкм.		
МСУ-МР		RSML	3	0,5-0,7 мкм; 0,7-1,1 мкм; 1,6-1,8 мкм; 3,5-4,1 мкм; 10,5-11,5 мкм; 11,5-12,5 мкм.	НЦ ОМЗ	www.ntsomz.ru
<sup>2</sup> БРЛК		RSML	0,18 Мб	рабочая длина волны 3,12 см	НЦ ОМЗ	www.ntsomz.ru
<sup>2</sup> МТВЗА-ГЯ		RSML	1	26 каналов в полосе 10,6-183,3 ГГц	НЦ ОМЗ	www.ntsomz.ru
<sup>2</sup> ИКФС-2		RSML	3	5-15 мкм	НЦ ОМЗ	www.ntsomz.ru
МСУ-ГС				0,5–0,65мкм; 0,65–0,8мкм; 0,8-0,9мкм; 3,5-4,01мкм; 5,7-7,0мкм; 7,5–8,5мкм; 8,2-9,2мкм; 9,2-10,2мкм; 10,2-11,2мкм; 11,2-12,5мкм.	НЦ ОМЗ	www.ntsomz.ru
ГГАК-Э						

<sup>1</sup> Данные с аппаратуры КШМСА КА «Ресурс-П»: выполняется только комплексирование

<sup>2</sup> Данные с аппаратуры БРЛК, МТВЗА-ГЯ, ИКФС-2 КА «Метеор-М» только архивируются

<sup>3</sup> В файлопотоке КА «Канопус-В» разделение на МСС ПСС выполняется только в программном комплексе создания стандартных продуктов.

<sup>4</sup> Спектральные каналы, которые используются для цветосинтеза.

### 1.3 Основные рабочие процессы

Технологический процесс распределения потоков целевой информации при функционировании при функционировании космической системы ДЗЗ как единой информационной системы связан с обработкой заявок потребителей на готовый тематический продукт, степень глубины обработки которого зависит от требований потребителя, сформулированные в соответствующей заявке. Это могут быть как как простые так и тематически обработанные снимки в различных диапазонах, анализ результатов обработки и т.п. Обслуживания каждой заявки разбивается на

этапы (фазы), следующие друг за другом. Последовательности этапов (фаз) ставится в соответствие последовательность основных рабочих процессов:

- сбор заявок, планирование;
- передача/прием циклограмм;
- съемка и хранение на борту;
- передача/прием отснятых маршрутов;
- стандартная или тематическая обработка
- архивация и доставка тематического продукта.

Основные рабочие процессы, происходящие в системе, представляют собой взаимодействия между объектами, описанными в разделе 1.2. В результате взаимодействия происходит обмен данными и определенное преобразование свойств и/или состояний взаимодействующих объектов. Рабочие процессы, связанные с одной заявкой, как правило не совпадают по времени с одноименными процессами, связанными с другой заявкой, т.е. работа системы состоит из множества рабочих процессов, выполняемых последовательно-параллельно.

### **1.3.1 Сбор заявок**

Процесс сбора заявок происходит во взаимодействии потребителей с оператором системы. Реализация функции сбора заявок осуществляется с определенной периодичностью через комплекс взаимодействия с потребителями данных ДЗЗ, являющийся составной частью оператора системы. Заявки могут поступать в систему разными путями, но все большее число потребителей предпочитает использование для подачи заявки и получения готового продукта Интернет/Интранет технологии. С этой целью в информационной системе потребителям обеспечен оперативный доступ к странице заказа данных. В электронном каталоге системы (<http://www.ntsomz.ru/zakaz/data>) содержится гигантский архив уже полученных и обработанных снимков. Если нужный снимок не найден в каталоге, то, пользуясь предлагаемой формой, потребитель заполняет заявку и сохраняет ее на сервере. Заявка, удовлетворяющая правилам входного контроля (см. п.1.2.5.), автоматически регистрируется. Регистрация заявки

означает, в частности, присвоение ей общесистемного номера  $j$  и фиксацию даты и времени ее подачи. С этого момента начинается отсчет времени обслуживания заявки  $T_{обслj}$ .

Система предполагает несколько периодов планирования: текущее – порядка суток, среднесрочное – несколько десятков суток и долгосрочное – до года.

К концу текущего периода текущего планирования (например, полутора суток) формируется множество заявок  $\Xi$ , поступивших в течение этого периода (этих полутора суток).

### 1.3.2 Планирование

Процесс планирования работы целевой аппаратуры КА орбитальной группировки включает долгосрочное и текущее планирование и осуществляется на основе заявок потребителей данных ДЗЗ [49]. При долгосрочном планировании оператор системы формирует план космических съемок на очередной год. В течение года заявки могут уточняться ежеквартально или по мере необходимости с внесением изменений в план космических съемок. Заявки от потребителей поступают на комплекс взаимодействия с потребителями, где производится их учет, формализация и оценка реализуемости, исходя из баллистических и технических возможностей КА [49].

Например, на основе поступивших заявок с учетом баллистических данных и результатов текущих метеопрогнозов осуществляется [49]:

- моделирование съемок заданных районов на период до 180 суток и среднесрочное планирование съемки в интервале до 30 суток с учетом важности объектов и районов, состояния КА и НКИ, результатов ранее проведенных съемок;
- формирование единого оперативного каталога объектов и районов съемки для текущего (оперативного) планирования;
- текущее планирование работы целевой аппаратуры (ЦА).

На этапе долгосрочного планирования осуществляется распределение приоритетов съемки районов, заданных в плане космических съемок на очередной

год, а также распределение информационного ресурса КА для различных потребителей данных ДЗЗ в зависимости от приоритетов стоящих задач [49].

Текущее планирование работы ЦА осуществляется комплексом оперативного (текущего) планирования. Разработка плана работы целевой аппаратуры выполняется на основе каталога объектов и районов съемки, формируемого ежесуточно [49].

Процесс текущего планирования, порождаемый заявками потребителей, выполняет оператор системы, формируя циклограммы работы КА орбитальной группировки и ППИ из состава НКИ.

Тип задействованного КА определяется заявкой потребителя. Номер конкретного КА-исполнителя затребованного снимка определяет оператор системы.

Если потребителем запрошена съемка нескольких районов, то в план съемки включается программа управления ориентацией оси визирования съёмочной аппаратуры, задающая маршрут съемки. Считается, что план съемки может включать данные, относящиеся к разным заявкам.

Для расчета плана съемки необходимо, в частности, решить следующие задачи:

- определить предположительную дату съемки с учетом ограничения на долю незакрытой облачностью территории, указанной в заявке, и прогнозируемого количества облачности в запрошенном районе съемки;
- определить номер КА-исполнителя съемки, рассчитав взаимное расположение трасс и полос обзора КА заданного типа и района(ов) съемки на предположительную дату съемки;
- рассчитать маршрут съемки с учетом возможных попутных заявок, близких по времени и требуемым районам, ширины полосы захвата и необходимости переориентации оси визирования съёмочной аппаратуры;
- вычислить моменты включения/выключения бортовой аппаратуры, реализующей процесс съемки маршрута;

- определить номер ППИ-приемника данных из бортового запоминающего устройства (БЗУ) КА-исполнителя и рассчитать моменты включения/выключения бортовой аппаратуры, реализующей процесс передачи отснятых данных;
- сформировать циклограмму работы бортовой съемочной, записывающей и передающей аппаратуры, а также системы управления ориентацией;
- получить данные по эфемериде КА-исполнителя и сформировать циклограмму работы ППИ-приемника.

По окончании этапа планирования формируются:

- векторы длительностей съемки  $\Delta T_{sch}$   $s$ -го КА;
- вектор-функции управления съемочной аппаратурой  $U_{sch}(t)$   $s$ -го КА, у которых координаты равные 1, когда аппаратура включена или 0, когда аппаратура выключена;
- вектор-функции управления работой информационного тракта и записи в БЗУ  $U_{san}(t)$   $s$ -го КА, у которых координаты равны 1, когда аппаратура включена или 0, когда аппаратура выключена;
- вектор-функции управления программным разворотом по крену  $\Gamma_s(t)$  и тангажу  $\Theta_s(t)$   $s$ -го КА, у которых координаты – функции управления по крену и тангажу соответственно для реализации маршрута  $k$ -й съемки, равные 1, когда аппаратура включена или 0, когда аппаратура выключена;
- вектор-функции управления программным разворотом по азимуту  $A_r(t)$  и углу места  $B_r(t)$  антенны  $r$ -го ППИ, у которых координаты– функции управления по азимуту и углу места соответственно для реализации  $n$ -го сеанса связи, равные 1, когда аппаратура включена или 0, когда аппаратура выключена.

Все вышеперечисленные вектор-функции определены для моментов времени, лежащих на интервале планирования  $[0, T_n]$ .

Длительность процесса планирования зависит от приоритета и параметров заявки, производительности комплекса планирования, длины  $q$ -ой очереди и т.д. и может составлять от 8 до 10 часов.

Кроме того, на этапе планирования решаются взаимосвязанные задачи, относящиеся к этапам обработки снимков, архивации и распространения готовых продуктов:

- определить номер(а) ППИ из состава НКИ, проводящего обработку отснятого маршрута съемки до заданного в  $j$ -й заявке уровня;
- определить номер(а) центра НКИ, выполняющего архивацию и долговременное хранение готового продукта;
- определить маршруты передачи продуктов обработки между ППИ по сети передачи данных.
- определить маршрут передачи готового продукта по сети передачи данных потребителю.

Отдельный процесс планирования преобразует данные одной или нескольких заявок в циклограмму работы конкретного КА и конкретного ППИ. Совокупность нескольких процессов планирования формирует набор циклограмм, определяющих работу орбитальной группировки и центров НКИ в течение установленного периода планирования.

Одним из недостатков существующей системы планирования является то, что как архивация, так и обработка снимков до готового тематического продукта проводятся в рамках одного ППИ, без учета текущих возможностей других. При увеличении числа КА орбитальной группировки это может привести к неравномерной загрузке на КА и ППИ и, как следствие, к отказам в обслуживании [101].

### **1.3.3 Передача и прием циклограмм**

Процесс передачи циклограмм происходит во взаимодействии ЦУП, оператора системы или ППИ, назначенных оператором, и конкретных КА орбитальной группировки. Сформированные в процессе текущего планирования рабочие программы ЦА передаются в ЦУП для включения их в рабочую программу совместно с программой работы обеспечивающей аппаратуры КА. Далее единая рабочую программу закладывается на борт КА в сеансе связи с ним [49].

При передаче конкретной циклограммы тип задействованного КА определяется заявкой потребителя, номер КА и номер ППИ задается циклограммой.

Объем циклограммы может составлять от нескольких Кбайт до нескольких десятков Кбайт. В зависимости от баллистической ситуации время ожидания от момента готовности рабочей программы до момента начала закладки рабочей программы на борт может составлять от нескольких десятков минут до 12 часов.

Принятая на борт циклограмма размещается в БЗУ в виде последовательности команд.

Длительность процесса передачи/приема (закладки на борт), как правило, не превышает 10 мин.

### 1.3.4 Съёмка и хранение на борту КА

Процесс съёмки маршрута реализуется согласованной работой целевой аппаратуры, системы ориентации и стабилизации, информационного тракта и БЗУ КА в соответствии с заданной циклограммой. Результатом съёмки маршрута являются «сырые» данные, имеющие объем  $v_m$ , размещаемые в БЗУ и занимающие определенную его часть:

$$v_m = v_m / V_{\text{БЗУ}}, \quad 0 \leq v_m \leq 1 \quad (1.1)$$

Съёмка начинается и заканчивается в моменты времени, определенные в циклограмме по данным, имеющимся в заявке(ах). Одновременно с процессом съёмки осуществляется запись получаемых данных в цифровой форме в БЗУ. Предполагается, что объем сформированного файла зависит линейно от времени съёмки. Параметры линейной зависимости – свои для каждого типа КА. Освобождение занятого объема БЗУ (обнуление) может происходить только после получения на борт подтверждающей команды.

### 1.3.5 Передача и прием данных

Процесс передачи/приема отснятого маршрута происходит во взаимодействии КА с ППИ системы. Процессы съемки маршрута и передачи данных зондирования из БЗУ могут проходить параллельно. В результате в долговременной памяти рабочей станции ППИ размещается файл(ы), представляющий(е) собой «сырой» снимок либо его части. Формат файлов определяется установленными параметрами технологического процесса, принятого на данном ППИ. В зависимости от параметров снятого маршрута объем файла «сырого» снимка может составлять от 0,3 до 25 и более Гбайт.

Процессу передачи данных, размещенных в БЗУ, предшествует процесс хранения, длительность которого определяется циклограммой в соответствии с взаимным расположением трассы КА, ближайшего ППИ и потребителя. Согласно технологическому регламенту время хранения и сброса целевой информации рассчитывается оператором системы, предварительно определяющим список «допущенных» ППИ, т.е. способных провести прием данных с конкретного КА, по одному из возможных правил:

- если возможно, то весь занятый объем БЗУ - первому ППИ, ближайшему к потребителю;
- иначе, если возможно, то весь занятый объем БЗУ - первому ППИ, ближайшему по трассе;
- иначе, если возможно, то первому ППИ, ближайшему по трассе - максимальную часть занятого объема БЗУ;
- иначе, остаток занятого объема БЗУ - первому ППИ, ближайшему по трассе.

Процесс передачи/приема начинается и заканчивается в моменты времени, определенные в циклограмме.

Основным недостатком использования вышеперечисленного правила является то, что учет степени текущей загруженности ППИ, с которым предполагается сеанс приема/передачи информации с КА осуществляется в «ручном» режиме. Да и само понятие «степень загруженности» на данный момент

носит скорее чисто интуитивный характер. Такой подход возможен при сравнительно небольшом количестве КА ОГ ДЗЗ. Однако при значительном наращивании орбитальной группировки это может привести к сбоям и, как следствие, увеличению времени когда информация с КА будет передана для дальнейшей обработки.

### **1.3.6 Обработка снимков**

Обработка принятой на ППИ целевой информации реализуется технологическим процессом, разделенным на несколько операций, число которых зависит от затребованного в заявке уровня обработки. В зависимости от сложности используемых алгоритмов разные операции требуют применения разного аппаратно-программного обеспечения и квалификации персонала. Поэтому отдельные операции могут выполняться на разных ППИ, но прием информации и предварительная ее обработка – на любом ППИ из состава НКИ.

В ходе предварительной обработки принятого пакета последовательно выполняются следующие процедуры [49]:

- выделяются данные служебной и целевой аппаратуры;
- видеоданные группируются по циклам сканирования и оценивается качество информации;
- выполняется перевод телеметрических кодов измерений в значения интенсивности по данным предполётной и текущей бортовой калибровки;
- осуществляется координатная привязка измерений;
- формируются аннотированные файлы результатов предварительной обработки.

Длительность технологического цикла предварительной обработки и занесения данных в оперативный архив составляет не более 20 минут.

Вслед за предварительной обработкой выполняются операции стандартной обработки до заказанного уровня, имеющие разную трудоемкость и требующие разной квалификации исполнителей (см. п. 1.2.3).

Процесс обработки снимков реализуется персоналом того ППИ, который получил задание от оператора системы, с использованием штатного аппаратно-программного обеспечения. Длительность процесса обработки зависит от технической оснащенности, квалификации персонала, требуемого уровня обработки и параметров циклограммы и др.

В настоящее время одной из нерешенных задач оператора системы – спланировать такой маршрут передачи обрабатываемого снимка между ППИ, который обеспечит выполнение нужной последовательности технологических операций наилучшим образом.

### **1.3.7 Архивация и доставка тематического продукта**

Процесс архивации реализуется с использованием штатного аппаратно-программного обеспечения либо персоналом того ППИ, который назначен оператором системы. Длительность процесса зависит от производительности ППИ-исполнителя, производительности ППИ-хранителя и используемого канала связи между ними.

Процесс доставки происходит во взаимодействии оператора системы с потребителем. Длительность процесса зависит зависимости от используемого канала связи, объема и формата конечного продукта.

### **1.3.8 Процесс обслуживания единичной заявки**

Обобщая вышесказанное (см п.п. 1.2, 1.3.1–1.3.7) рассмотрим процесс обслуживания единичной заявки. Обслуживание единичной заявки, поступившей в систему, сопровождается цепочкой сменяющих друг друга событий, привязанных к последовательным моментам времени (рисунок 1.). Введем следующие обозначения (индекс номера заявки опущен для краткости):

$t_0$  – момент поступления заявки в систему;

$t_y$  – момент готовности циклограммы;

$t_{ny1}$  – момент начала передачи циклограммы;

- $t_{нц2}$  – момент окончания передачи циклограммы;
- $t_{обл}$  – прогнозируемый момент начала съемки с допустимой безоблачной долей заданного района
- $t_{смк1}$  – момент начала съемки, назначенный циклограммой при условии, что количество облачности над районом съемки не превышает допустимое;
- $t_{смк2}$  – момент окончания съемки, назначенный циклограммой при условии, что количество облачности над районом съемки не превышает допустимое; считается, что к этому моменту снимок маршрута сохранен в БЗУ  
или  
момент окончания выгрузки данных из архива;
- $t_{нд1}$  – момент начала передачи данных на ППИ, определенном циклограммой;
- $t_{нд2}$  – момент окончания передачи данных на ППИ, определенном циклограммой;
- $t_{обр1}$  – момент начала тематической обработки данных на первом ППИ, определенном циклограммой;
- $t_{обр2}$  – момент окончания тематической обработки данных последнем ППИ, определенном циклограммой;
- $t_{арх1}$  – момент начала архивации конечного продукта на ППИ, определенном циклограммой;
- $t_{арх2}$  – момент окончания архивации конечного продукта на ППИ, определенном циклограммой;
- $t_{дос1}$  – момент начала доставки конечного продукта от ППИ, определенного циклограммой, до потребителя
- $t_{дос2}$  – момент окончания доставки конечного продукта от ППИ, определенного циклограммой, до потребителя.

Очевидно, что, если прогноз количества облачности над районом съемки положительный и съемка маршрута не совмещается со сбросом его данных, то процесс обслуживания физически реализуем, когда

$$t_0 < t_{\text{ц}} < t_{\text{нц}1} < t_{\text{нц}2} < t_{\text{смк}1} < t_{\text{смк}2} < t_{\text{нд}1} < t_{\text{нд}2} \leq t_{\text{обр}1} < t_{\text{обр}2} \leq t_{\text{арх}1} < t_{\text{арх}2} \leq t_{\text{дос}1} < t_{\text{дос}2}$$

причем, нестрогие неравенства имеют место, если обработка ведется на том ППИ, который вел прием данных с КА, или архивацию выполняет тот же ППИ, который проводил обработку, или доставку выполняет тот же ППИ, который проводил архивацию.

В соответствии с введенными обозначениями имеем (рисунок 1.7):

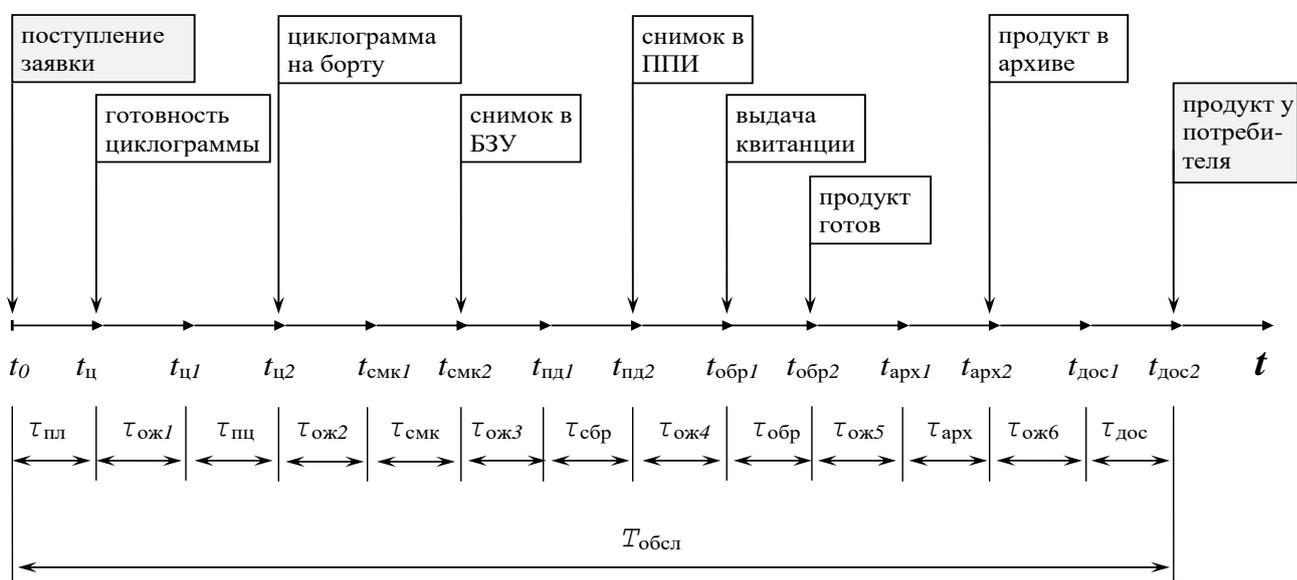


Рисунок 1.7 – Схема процесса обслуживания единичной заявки при отсутствии учета облачности над районом съемки

где

$$\tau_{\text{пл}} = t_{\text{ц}} - t_0 \quad \text{— длительность планирования;}$$

$$\tau_{\text{ож}1} = t_{\text{нц}1} - t_{\text{ц}} \quad \text{— длительность ожидания передачи циклограммы;}$$

$$\tau_{\text{нц}} = t_{\text{нц}2} - t_{\text{нц}1} \quad \text{— фактическая длительность передачи циклограммы;}$$

$$\tau_{\text{ож}2} = t_{\text{смк}1} - t_{\text{нц}2} \quad \text{— длительность ожидания съемки;}$$

$$\tau_{\text{смк}} = t_{\text{смк}2} - t_{\text{смк}1} \quad \text{— фактическая длительность съемки;}$$

$$\tau_{\text{ож}3} = t_{\text{нд}1} - t_{\text{смк}2} \quad \text{— длительность ожидания передачи данных;}$$

- $\tau_{сбр} = t_{нд2} - t_{нд1}$  – фактическая длительность сброса данных;
- $\tau_{ож4} = t_{обр1} - t_{нд2}$  – длительность передачи на обработку;
- $\tau_{обр} = t_{обр2} - t_{обр1}$  – фактическая длительность обработки;
- $\tau_{ож5} = t_{арх1} - t_{обр2}$  – длительность передачи на архивацию;
- $\tau_{арх} = t_{арх2} - t_{арх1}$  – фактическая длительность архивации;
- $\tau_{ож6} = t_{дос1} - t_{арх2}$  – длительность передачи на доставку;
- $\tau_{дос} = t_{дос2} - t_{дос1}$  – фактическая длительность доставки продукта потребителю.

Технологический процесс создания конечного продукта, затребованного  $q$ -м потребителем в  $j$ -й заявке, складывается из последовательности основных рабочих процессов, описанных выше.

### ***Учет облачности отсутствует***

При отсутствии учета облачности можно считать, что полное время обслуживания  $t_{обслj}$  определяется формулой

$$\tau_{обслj} = \tau_{плq} + \tau_{обсл1} + \tau_{обсл2} + \tau_{обсл3} + \tau_{обсл4} + \tau_{обсл5} + \tau_{обсл6}; \quad (1.2)$$

где  $\tau_{обсл1}$  – фактический интервал времени обслуживания  $q$ -й заявки на этапе передачи циклограммы:

$$\tau_{обсл1} = \tau_{ож1} + \tau_{пц};$$

$\tau_{обсл2}$  – фактический интервал времени обслуживания  $q$ -й заявки на этапе съемки и записи в БЗУ,

$$\tau_{обсл2} = \tau_{ож2} + \tau_{смкq};$$

$\tau_{обсл3}$  – фактический интервал времени обслуживания  $q$ -й заявки на этапе сброса данных, включающий соответствующий маршрут:

$$\tau_{обсл3} = \tau_{ож3} + \tau_{сбрq};$$

$\tau_{обсл4}$  – фактический интервал времени обслуживания  $q$ -й заявки на этапе обработки снимка до заданного уровня:

$$\tau_{обсл4} = \tau_{ож4} + \tau_{обрq};$$

$\tau_{обсл5}$  – фактический интервал времени обслуживания  $q$ -й заявки на этапе архивации:

$$\tau_{обсл5} = \tau_{ож5} + \tau_{архq};$$

$\tau_{обсл6}$  – фактический интервал времени обслуживания  $q$ -й заявки на этапе доставки:

$$\tau_{обсл6} = \tau_{ож6} + \tau_{досq}.$$

### **Учет облачности**

Если по прогнозу на ближайший из возможных момент начала съемки  $t_{смк1}$  количество облачности над районом съемки превышает допустимое значение, то выбирается следующий возможный момент (для другого КА или другого витка того же КА). Иначе, когда прогноз на момент положительный, т.е. количество облачности меньше допустимого:

$$t_{смк1} \geq t_{бобл},$$

формула (1.2) видоизменяется.

Пусть  $\tau_{освq}$  - время ожидания  $q$ -й заявкой освобождения  $s$ -го канала обслуживания (суммарная длительность времени закладки циклограммы на борт и времени подхода конкретного КА к району съемки, т.е. интервал времени от момента окончания подготовки циклограммы для  $s$ -го КА до момента накрытия района съемки его полосой обзора), которое определяется равенством

$$\tau_{освq} = \tau_{ож1} + \tau_{пл} + \tau_{ож2}.$$

Для определения времени ожидания съемки используется формула

$$\tau_{ожq} = \max(\tau_{боблq}, \tau_{плq} + \tau_{освq}), \quad (1.3)$$

где  $\tau_{боблq}$  – время ожидания  $q$ -й заявкой допустимой безоблачной доли заданного района,  $\tau_{боблq} = t_{бобл} - t_0$ ,  $\tau_{плq}$  - время обслуживания  $q$ -й заявки на этапе планирования (время подготовки циклограммы).

Формула (1.3) принимает вид

$$\tau_{обсл j} = \tau_{ожq} + \tau_{смкq} + \tau_{обсл3} + \tau_{обсл4} + \tau_{обсл5} + \tau_{обсл6}, \quad (1.4)$$

где  $\tau_{смкq}$  – фактическое время съёмки маршрута в соответствии с  $q$ -й заявкой.

### 1.3.9 Объектная модель системы

С точки зрения информационных технологий рассматриваемую космическую систему ДЗЗ можно представить как совокупность технологий хранения и передачи информации, распределенных вычислений и доставки готового продукта, которые позволяют, с одной стороны, получать тематический продукт требуемого качества за минимальное время, а с другой — оптимизировать затраты на них.

При этом, инфраструктура и архитектурные решения элементов инфраструктуры системы обладают рядом общих характерных черт. К таким чертам следует отнести территориальную распределенность ППИ, использование вычислительных средств и систем хранения стандартной архитектуры, а также широкое применение технологий виртуализации ресурсов.

Очевидно, что нагрузка на ППИ будет неравномерной и может иметь случайные всплески. Поэтому обработчик запроса потребителя должен определяться динамически, чтобы достичь лучшей производительности и как можно полнее использовать имеющиеся ресурсы. Данная проблема может быть разбита на три: долгосрочное, среднесрочное и оперативное (текущее) планирование размещения запросов:

- при долгосрочном планировании размещения решается задача закрепления определенных сервисов по ППИ в незагруженной системе, с учетом только предполагаемых требований потребителя, вычислительных возможностей и платформенных ограничений;
- среднесрочное планирование размещение предполагает учет плановых запросов пользователей;

- под оперативным размещением понимается распределение задач между ППИ в соответствии с изменением состояния системы.

Проводить частые изменения в размещении сервисов при долгосрочном и среднесрочном планировании непрактично в связи с накладными расходами на их миграцию. Также задача среднесрочного планирования размещения возникает в тех случаях, когда оперативное распределение ресурсов приводит к неудовлетворительным результатам. В этом случае система должна иметь достаточное время для определения плана размещения. Для оперативного планирования размещения и быстрой адаптации к изменениям в системе или к нагрузке, система требует принятия решений в реальном времени для того, чтобы сократить общий спад производительности.

В любом случае распределение запросов пользователей состоит в оптимальном закреплении (долгосрочном, среднесрочном и краткосрочном планировании) за ними соответствующих ППИ. В настоящее время преобладающей архитектурой является многозвенная архитектура. Когда клиент посылает запрос, то он попадает к контроллеру, распределитель нагрузки, являясь частью контроллера направляет запрос в очередь к нужному приложению. Время обработки различных запросов может существенно отличаться, поэтому они неоднородны. Каждый запрос может быть представлен в виде графа, каждому элементу которого соответствует звено «приложение-ППИ». В этом случае задачей контроллера является формирование многозвенного приложения для обработки запроса пользователя (рисунок 1.8). Перечень основных звеньев и их рабочие процессы представлены в п. 1.2, 1.3.

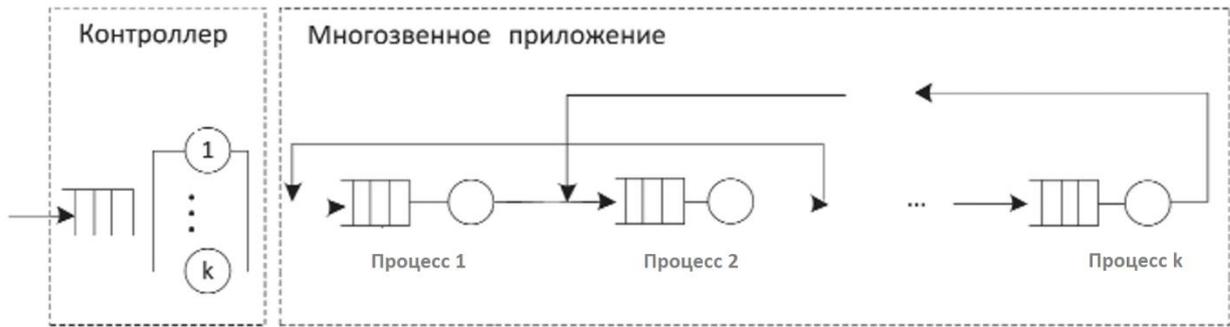


Рисунок 1.8 – Модель обслуживания заявки потребителя  
с многозвенным приложением

#### 1.4 Анализ и формирование показателей эффективности

Под показателем эффективности будем понимать количественные характеристики требований к эффективности системы, служащие для выбора наилучшей альтернативы из всех пригодных [52]. Например, показателями эффективности могут быть производительность, оперативность и т.п. При этом, особую роль играют показатели, оценивающие затраты ресурсов. Для создания и эксплуатации любой системы необходимы определенные затраты ресурсов (денежных средств, оборудования, материалов, энергии, рабочей силы и т.д.). Для каждой из альтернатив достижения цели системы требуются свои затраты ресурсов, чаще всего оцениваемые показателем стоимости создания и эксплуатации системы. В общем случае может оказаться необходимым учитывать кроме стоимости и затраты других материальных ресурсов

При выборе показателей учитывается, что показатель должен:

- обеспечивать оценку выполнения соответствующего требования, предъявляемого к системе;
- быть чувствительным к анализируемым вариантам системы, в частности, к выбираемым параметрам;
- быть достаточно простым и наглядным, иметь ясный физический смысл, чтобы у лица, принимающего решение, не возникало затруднений при физической интерпретации результатов исследования.

Под критерием (или критерием предпочтения) будем подразумевать правило, с помощью которого по значениям показателей качества, эффективности и стоимости рекомендуется предпочтительный вариант системы. Так, исследователь может рекомендовать такой из альтернативных вариантов, который обеспечит выполнение критерия «минимальная стоимость системы при показателях качества и эффективности не хуже требуемых значений». Дополнительные условия, при этом, можно рассматривать либо как один из компонентов критерия, либо как ограничения. И в том и в другом случае задача построения критерия упрощается, так как выявляются показатели, которые следует строго ограничивать.

На практике часто требуется, чтобы математическая модель одновременно позволяла проводить расчет эффективности целевого применения информационной системы по различным критериям (или одному наиболее предпочтительному из состава выбранных). Решение такой сложной задачи оптимизации целевого функционирования возможно лишь при разработке и применении специально разработанных методов, а именно методов комплексной многокритериальной оптимизации, адаптированных к условиям функционирования многоцелевой информационной системы.

В нашем случае, под эффективным целевым применением космической системы ДЗЗ понимается использование эксплуатационных возможностей группировки КА системы и наземной инфраструктуры для производства совокупности конечных информационных продуктов, наиболее полно соответствующей совокупности заявок потребителей [37].

В общем случае оценку качества функционирования системы необходимо проводить с использованием принципа декомпозиции на всех уровнях [52, 80]:

- - системном (оценка эффективности системы в целом);
- - функциональном (оценка эффективности функциональных подсистем);
- - техническом (оценка эффективности отдельных элементов).

С учетом уровня декомпозиции показатели эффективности системы можно разделить на группы:

1) Технические показатели эффективности целевого функционирования, отражающие оценки отдельных свойств системы:

- разрешение обработанных снимков;
- точность плановой привязки обработанных снимков;
- суммарный объем информации, полученной на наземный комплекс приема, обработки и распространения (НКПОР);
- суммарная отснятая площадь (производительность системы) и др.

2) Функциональные показатели эффективности системы, отражающие оценки свойств подсистем:

- вероятности обслуживания заявок в зависимости от приоритета;
- вероятности отказа в обслуживании заявок в зависимости от приоритета;
- оперативность исполнения заявок в зависимости от приоритета;
- глубина обработки отснятых маршрутов в зависимости от приоритета;
- суммарная относительная площадь, выданная потребителям, в зависимости от приоритета и др.

3) Показатели эффективности системы в целом, отражающие интегральные оценки свойств системы:

- суммарное время обслуживания заявок;
- эффективная производительность системы (суммарная относительная площадь, выданная потребителям);
- совокупная ценность продуктов обработки отснятых маршрутов;
- осредненная оперативность исполнения заявок;
- суммарный объем архивов НКПОР и др.

Все показатели эффективности зависят от баллистической структуры, характеристик целевой аппаратуры и наземного комплекса приема обработки и распределения информации.. При этом оптимизация целевых параметров функционирования представляет собой два основных блока: оптимизация работы бортовой целевой аппаратуры КА и наземного комплекса.

В некоторых случаях объективно существует возможность перехода от многих показателей к одной или двум-трем целевым функциям (объективное

свертывание). Такая возможность появляется при переходе к рассмотрению надсистемы, в состав которой входит синтезируемая система, если эффективность этой надсистемы можно оценить с помощью этих показателей. Конечно, при этом необходимо привлекать некоторую дополнительную информацию, позволяющую рассчитать показатель эффективности надсистемы при всех альтернативах синтезируемой системы.

В нашем случае, когда в состав системы входят компоненты космического и наземного сегмента объективное свертывание позволяет перейти к частным показателями, характеризующими эффективность целевого функционирования, которыми являются оперативность (время) выполнения заявок на получение готового тематического продукта и стоимость готового тематического продукта.

Оперативность выполнения заявок зависит от оперативности приема-передачи информации с борта КА на ППИ и времени, необходимого для проведения съемки. Данный показатель напрямую зависит от параметров заявки потребителя (географического положения, наблюдаемой площади, спектральных диапазонов, требований к тематическому продукту), географического расположения ППИ, их возможностей по получению готового тематического продукта, баллистического построения орбитальной группировки КА ДЗЗ и поэтому может использоваться как комплексный (интегральный) показатель эффективности космической системы ДЗЗ, с точки зрения представления ее как информационную.

Стоимость готового тематического продукта также характеризует эффективность целевого функционирования нашей системы. Если рассматривать систему в целом, то, конечно, в качестве показателя необходимо выбирать доход или прибыль. Но формализовать модель расчета такого рода показателей не представляется возможным, поэтому стоимость готового продукта, как определяющая часть при расчете дохода или прибыли, и выбрана в качестве показателя эффективности. Для минимизации значения этого показателя необходимо решить оптимизационную задачу оперативного планирования обработки заявки потребителя, т.е. сформировать план (маршрут) обработки

информации.

Оба показателя рассчитываются на основе моделирования процесса обработки информации с момента подачи заявки до момента передачи требуемого тематического продукта потребителю и, таким образом, характеризуют эффективность целевого функционирования системы с учетом параметров бортовой целевой аппаратуры КА, баллистического построения орбитальной группировки, факторов внешней среды, режимов съемки и передачи информации. Этот показатель также является комплексным (интегральным) [31].

Как видно из характеристик упомянутых выше показателей, каждый из них зависит от орбитального построения КСН и параметров бортовой целевой аппаратуры КА, характеристик НКПОР и в целом характеризует степень достижения целей космической системы ДЗЗ – получение потребителем информации с заданными требованиями по спектральному разрешению, периодичности наблюдений и оперативности передачи информации [31].

Перейдем к формализации описанных выше показателей эффективности целевого функционирования КСН.

#### ***Оперативность (время) выполнения единичной заявки***

Оперативность (время) выполнения единичной  $j_q$ -й заявки на получение готового тематического продукта естественно оценивать временем обслуживания  $T_{\text{обсл } q}$ , которое определяется формулой:

$$T_{\text{обсл } q} = t_{\text{дос2}} - t_0, \quad (1.5)$$

где согласно п.1.3.9

$t_0$  – момент поступления заявки в систему;

$t_{\text{дос2}}$  – момент окончания доставки конечного продукта от ППИ, определенного циклограммой, до потребителя.

Среднее время  $\bar{T}_{\text{обсл } q}$  исполнения заявок потребителей из множества  $\Omega_q$  рассчитывается по соотношению

$$\bar{T}_{\text{обсл } q} = \frac{1}{j_q^*} \sum_{j_{q=1}}^{j_q^*} T_{\text{обсл } q} \quad (1.6)$$

Показатель (1.6) количественно оценивает оперативность исполнения заявок из  $q$ -го входящего потока. Использование этой формулы для разных  $q$  ( $q = 1, 2, \dots, q^*$ ) позволяет найти вектор

$$\bar{T}_{\text{обсл}} = (\bar{T}_{\text{обсл } 1}, \bar{T}_{\text{обсл } 2}, \dots, \bar{T}_{\text{обсл } q^*})^T, \quad (1.7)$$

отражающий распределение среднего времени обслуживания заявок в зависимости от приоритета.

Осреднение величины  $T_{\text{обсл } q}$  по всему множеству заявок дает оценку математического ожидания времени исполнения (обслуживания) заявок  $M_{t \text{ обсл}}$ :

$$M_{t \text{ обсл}} = \frac{1}{q^*} \sum_{q=1}^{q^*} \bar{T}_{\text{обсл } q}, \quad (1.8)$$

и среднеквадратического отклонения времени исполнения (обслуживания) заявок:

$$\sigma_{t \text{ обсл}} = \sqrt{\frac{1}{j^*} \sum_{j=1}^{j^*} t_{\text{обсл } j}^2 - M_{t \text{ обсл}}^2}, \quad (1.9)$$

Тип закона распределения времени обслуживания заявок системой в целом, строго говоря, не известен. Однако, оценки главных его параметров: математического ожидания и среднеквадратического отклонения можно получить обработкой результатов статистического моделирования. Считается, что в первом приближении величину гарантированного времени обслуживания заявки  $T_{\text{гар}}$  можно оценить по соотношению

$$T_{\text{гар}} = M_{t \text{ обсл}} + 3\sigma_{t \text{ обсл}}, \quad (1.10)$$

в котором слагаемые правой части вычисляются с использованием формул (1.8) и (1.9).

В дальнейшем показатель (1.5) будем рассматривать как один из критериев предпочтения при выборе оптимального маршрута обработки информации, а показатели (1.8) и (1.9) – как качественные параметры для оценки распределения времени обслуживания заявок системой в целом.

### **Стоимость обслуживания единичной заявки**

Стоимость обслуживания единичной заявки  $C_{jq}$  складывается из составляющих, соответствующих основным процессам, рассмотренным в п. 1.3.9. По мере выполнения стадий технологического процесса обслуживания  $j_q$ -й заявки величина  $C_{jq}$  растет. Укрупненно ее можно представить в виде суммы условной стоимости  $C_{jq\text{КА}}$  снимка маршрута, размещенного в виде файла в БЗУ  $s$ -го КА и стоимости  $C_{jq\text{НКИ}}$  его наземной маршрутизации и обработки:

$$C_{jq} = C_{jq\text{КА}} + C_{jq\text{НКИ}}, \quad (1.11)$$

Составляющая  $C_{jq\text{КА}}$  обусловлена, в основном, удельными трудозатратами на планирование и расходованием ресурса  $s$ -го КА орбитальной группировки. Составляющая  $C_{jq\text{НКИ}}$  зависит от заданного в заявке уровня обработки и задействованных в передаче и обработке ППИ, т.е. от искомого маршрута обработки и передачи обрабатываемого снимка между ППИ.

Стоимость обслуживания заявки  $C_{jq}$  представляет собой приближенную оценку цены снимка с точки зрения заказчика, или дохода от выполнения заявки с точки зрения исполнителя заявки. Совокупная стоимость обслуживания всех заявок от потребителей из множества  $\Omega$  определяется равенством:

$$C_{\Sigma} = \delta_{jq} \sum_{q=1}^{q^*} \sum_{j_q=1}^{j_q^*} C_{jq}, \quad (1.12)$$

где  $\delta_{jq}(K) = 0$  или  $1$  – индикатор качества продукта, зависящий от оценки, характеризующей соответствие его качества требованиям, заданным в  $j_q$ -й заявке.

Показатель качества продукта, выдаваемого потребителю, должен количественно оценивать соответствие фактически реализованных свойств продукта указанным в заявке.

Требования к продукту, содержащиеся в заявке, можно разделить на две группы: 1) безусловные и 2) условные. К первой группе относятся требования, подлежащие обязательному выполнению, т.е. невыполнение любого из требований первой группы автоматически означает невыполнение заявки в целом. Эти требования формулируются в виде равенств. Ко второй группе относятся требования «диапазонного» типа, формулируемые в виде неравенств. Пример деления заявочных требований на группы представлено в таблицах 1.28 и 1.29.

Таблица 1.28 – Требования, подлежащие обязательному исполнению

№ п/п	Атрибут заявки	Тип исполнения
1	Тип платформы-носителя целевой аппаратуры	Да/нет
2	Состав аппаратуры, спектральные диапазоны	Да/нет
3	Приоритет районов (если их несколько)	Да/нет
4	Радиометрическое разрешение	Да/нет
5	Код уровня обработки	Да/нет
6	Система координат выходного изображения	Да/нет
7	Максимальный размер обработанного файла	Да/нет
8	Формат записи	Да/нет
9	Способ передачи конечного продукта	Да/нет

Таблица 1.29 – Требования «диапазонного» типа

№ п/п	Атрибут заявки	Минимальное значение	Максимальное значение
10	Интервал дат съемки	$t_{\text{СМК } 1}^{\min}$	$t_{\text{СМК } 1}^{\max}$
11	Периодичность съемки	$\Delta t_{\text{СМК } 1}^{\min}$	$\Delta t_{\text{СМК } 1}^{\max}$
12	Диапазон допустимых углов Солнца	$\gamma_{\text{sun}}^{\min}$	$\gamma_{\text{sun}}^{\max}$
13	Угол визирования	0	$\gamma_{jq}^{\max}$
14	Максимальная допустимая доля района, закрытая облачностью	0	$\Delta S_{jq}^{\max}$

В рассмотренном примере показатель качества продукта  $K$  определяется равенством

$$K = \sum_{l=1}^{14} k_l, \quad (1.13)$$

тогда продукт соответствует требованиям, указанным в заявке, если

$$9 < K \leq 14, \quad (1.14)$$

и чем больше величина  $K$ , тем выше качество продукта.

Индикатор  $\delta_{jq}$  качества продукта, изготовленного по  $j$ -й заявке, определяется по формуле

$$\delta_{jq}(K) = \begin{cases} 1, & 9 < K \leq 14 \\ 0, & K \leq 9 \end{cases} \quad (1.15)$$

В дальнейшем показатель (1.11) будем рассматривать как один из критериев предпочтения при выборе оптимального маршрута обработки информации, а

показатель (1.12) – как качественный параметр для оценки совокупной стоимости обслуживания заявок системой в целом.

### ***Выбор независимых переменных***

Особенностью функционирования космической системы ДЗЗ является ее целостность, системный характер зависимостей. Это означает, что отдельные элементы и отдельные факторы существуют и функционируют не независимо от других, а находятся в взаимосвязи. Тем не менее, решение задачи оптимизации показателей эффективности всегда требует наличие вектора независимых переменных. Независимая переменная должна быть относительно самостоятельным фактором, который оказывает свойственное именно ему воздействие на систему. Для нашей информационной системы в качестве таких независимых переменных предлагается использовать: **системное время** и **объем** (или условный объем, или трафик) перемещаемой в системе информации. Действительно, зная время и объем информации можно прямо или косвенно рассчитать как время, так и стоимость необходимые для обработки информации.

Таким образом, для оптимизации задачи распределения потоков целевой информации при функционировании космической системы ДЗЗ предлагается использовать два интегральных показателя: время и стоимость обработки заявки потребителя. Для качественной оценки функционирования системы предлагается использовать математическое и среднеквадратическое отклонение времени исполнения (обслуживания) и совокупную стоимость обслуженных заявок потребителей.

Преимуществом предложенного подхода является:

- уменьшение размерности вектора показателей эффективности до двух, что позволит в дальнейшем использовать эффективные методы многокритериальной оптимизации;
- аддитивность показателей эффективности, что в дальнейшем существенно упростит математическое описание и расчет их составных частей.

### ***Выбор ограничений***

Для того, чтобы оптимизационная задача имела нетривиальное решение необходимо наличие ограничений. Так как в рамках предлагаемого подхода, предполагается, что независимыми переменными являются время и объем информации (трафик), то ограничения должны, как минимум, учитывать возможности элементов системы по размещению в них информации и возможности многозадачности. В нашем случае такими ограничениями могут быть:

- ограничение на максимальное количество одновременно выполняемых процессов:  $N_{\text{проц}} \leq N_{\text{проц max}}$ ;
- ограничение на максимальный объем информации:  $V_{\text{вх}} + V_{\text{вых}} < V_{\text{своб}}$ .

### **1.5 Техническая постановка задачи управления распределением целевой информации по составным частям космической системы ДЗЗ**

При существенном наращивании орбитальной группировки КА ДЗЗ и увеличении пунктов приема и обработки информации (в том числе и мобильных) недостатки, выявленные при анализе основных объектов и рабочих процессов в системе ДЗЗ, проведенном в п. 1.1–1.3 будут принимать критический характер. К ним прежде всего относятся:

- низкий уровень планирования процессов распределения потоков целевой информации по составным частям космической системы ДЗЗ системы подтверждается тем, что даже при преобладании «обычных» в настоящее время заявок растет доля необслуженных заявок.
- обработка результатов съемки производится, как правило, на одном из ППИ, при этом выбор ППИ для создания тематического продукта потребителю носит как правило регламентный характер;
- при создании и архивации тематического продукта не учитываются возможности других территориально-распределенных ППИ, их текущая загруженность и разница во времени.
- учет степени текущей загруженности ППИ, с которым предполагается сеанс приема/передачи информации с КА осуществляется в «ручном»

режиме, да и само понятие «степень загруженности» на данный момент носит скорее чисто интуитивный характер.

Исторически сложилось, что задачи связанные с управлением космическим и наземным сегментом решаются независимо друг от друга. Так, в части космического сегмента можно выделить следующие задачи:

- многокритериальная оптимизация эффективности целевого функционирования на этапе определения баллистического построения и средств КА ДЗЗ исходя из решаемых задач;

- планирование съемки земных объектов средствами КА ДЗЗ, план съемки, при этом, является отправной точкой для решения задачи наземной обработки информации.

В дальнейшем, космические аппараты, входящие в состав ОГ КА ДЗЗ и, в совокупности, обеспечивающие требуемые заявкой характеристики космического снимка, будем называть кластером КА.

При наращивании кластеров КА, находящимися на разных орбитах, может возникнуть ситуация с избыточностью источников космической информации. В связи с этим целесообразно рассмотреть альтернативный вариант объединения информационных потоков космического и наземного сегмента в один общий поток и рассматривать оптимизацию его распределения с точки зрения общесистемных показателей эффективности. В этом случае появляется возможность осуществлять, хотя бы частичное, автономное планирование распределения информационных потоков и перенести значительной части функций планирования в вычислительную среду системы. Система планирования подобного типа позволит:

- проводить текущую обработку данных и создание тематического продукта;
- планировать использование ресурсов;
- прогнозировать возможные «узкие» места системы с привязкой к конкретным КА и ППИ.

Предлагаемый далее подход рассчитан на решение именно таких и даже более сложных задач.

С системной точки зрения, независимо от того, на каком этапе решается задача распределения целевой информации с разнотипных КА по составным частям системы (долгосрочное, краткосрочное или оперативное планирование) она сводится к оптимизации информационного маршрута, включающего:

- выбор нужного кластера КА;
- выбор наземных ППИ для передачи отснятых данных с КА-исполнителя(ей);
- выбор наземных ППИ для проведения полного цикла обработки данных;
- выбор ППИ для передачи тематического продукта потребителю.

Формально, распределение целевой информации по составным частям космической системы ДЗЗ происходит последовательно следующим образом (рисунок 1.9).

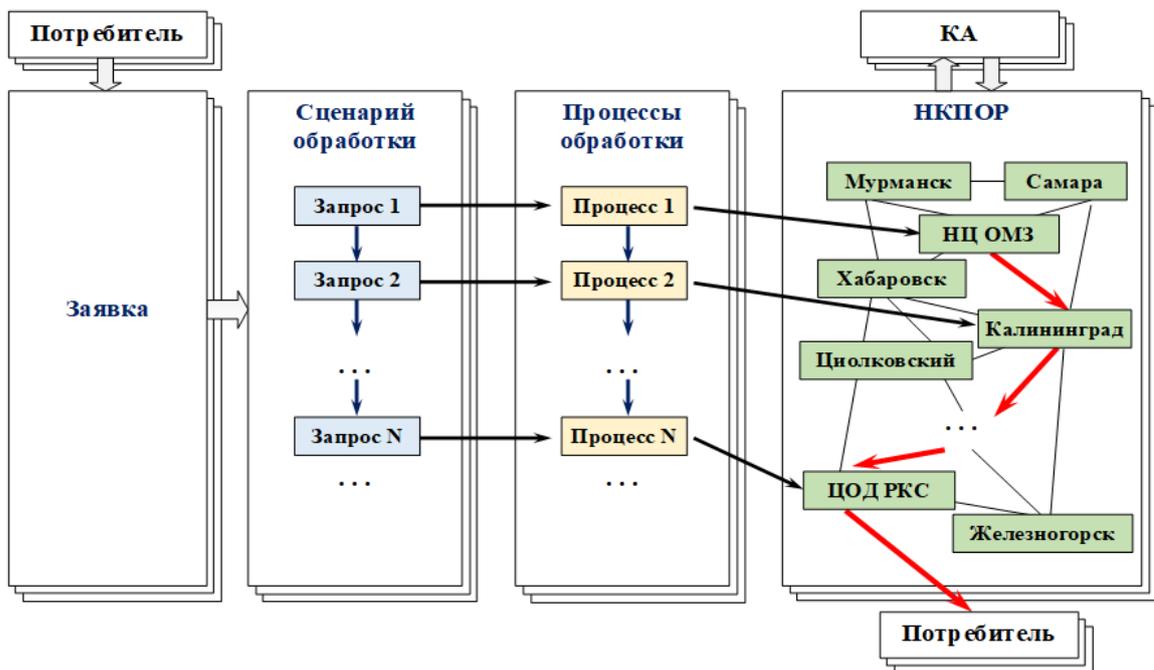


Рисунок 1.9 – Последовательность решения задачи

На входе имеется следующая информация:

- 1) информация о совокупности всех космических аппаратов и ППИ, которые определяют узлы нашей информационной системы, о которых нам известно:
  - в части ОГ КА ДЗЗ – перечень и технические характеристики всех КА;

– в части НКИ – перечень и характеристики (возможность хранения данных, степень обработки информации, подлежащей хранению, объем хранилища, тип выходной продукции, скорость передачи информации потребителям) пунктов приема информации (ППИ);

3) политика распределения вычислительных ресурсов (совокупность запретов и приоритетов на получение, обработку, хранение и выдачу информации потребителям);

4) перечень потребителей (географическое расположение, приоритет, заявки);

5) количество и пропускная способность каналов передачи информации между узлами, перечень абонентов каждого канала;

б) время выполнения и условная стоимость каждой операции.

Потребители формируют заявки к системе, каждый со своими требованиями и частотой. Заявки разных потребителей образуют входящий поток заявок системы. Каждый потребитель характеризуется своей предысторией: числом предыдущих заявок, их суммарным объемом и интенсивностью.

Заявка, поступившая от потребителя требует реакции информационной системы, которая заключается в формировании последовательности запросов на выполнение операций. Последовательность запросов определяется сценарием обработки. Например, в самом простейшем случае, это может быть:

- поиск данных в архиве или, если это невозможно, формирование плана для ближайшего к району съемки КА;
- прием информации;
- первичная обработка;
- каталогизация;
- стандартная обработка;
- передача готового тематического продукта потребителю.

Каждому запросу из сценария может быть поставлен в соответствие один из процессов, описанных в п. 1.3. Каждый из процессов может быть выполнен только в заранее определенных узлах системы.

Изначально, при поступлении заявки, процессы не распределены по составным частям, но известно, в каких узлах они могут выполняться. Учитывая географическую распределенность элементов инфраструктуры, а также различия в их производительности при решении однотипных задач возникает необходимость в принятии решения об оптимизации работы системы в целом.

Таким образом, необходимо определить распределение процессов обработки заявки пользователей по элементам инфраструктуры с целью повышения эффективности работы космической системы ДЗЗ в целом с учетом выбранных в для оптимизации показателей эффективности (см. п.1.4). При этом должны быть определены:

1) распределение процессов обработки информации ДЗЗ по узлам системы и архивам объектов НКИ;

2) время обеспечения потребителей заказанной информацией (с момента приема данных средствами НКИ или запроса архивных данных);

3) загруженность узлов и заполняемость их хранилищ информации;

Помимо всего прочего, предлагаемый подход по сравнению с существующей практикой (рисунок 1.10) позволит:

- повысить общий уровень планирования процессов распределения потоков целевой информации
- повысить уровень автоматизации распределения потоков целевой информации по составным частям системы в целом.

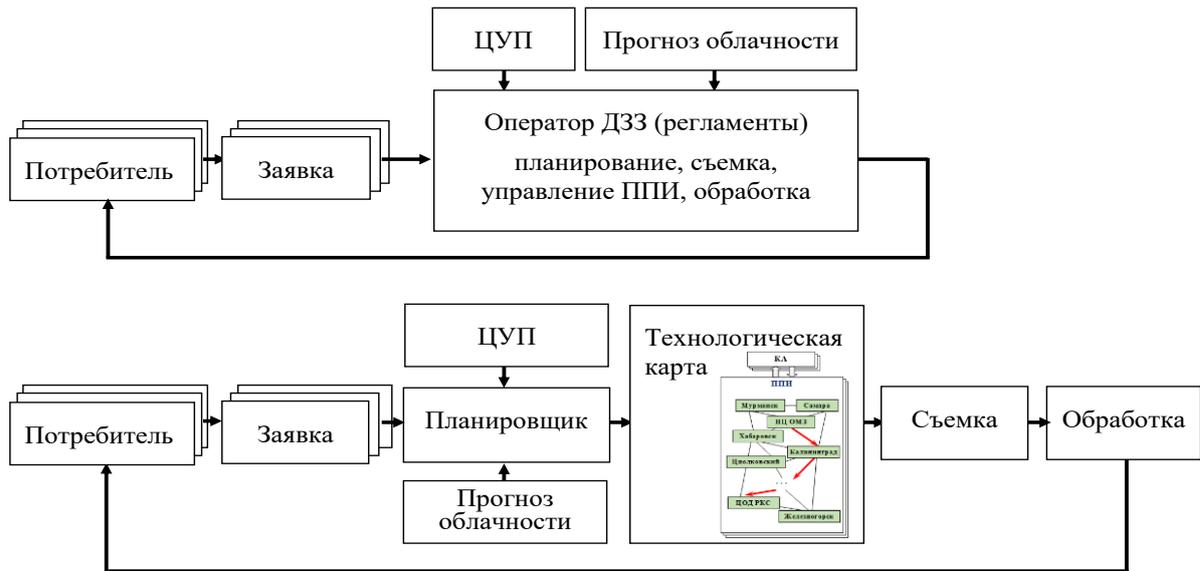


Рисунок 1.10 – Отличие существующего и предлагаемого подходов

Сложность процессов, происходящих при обработке данных ДЗЗ, приводит к тому, что их исследование на основе аналитических моделей для широкого диапазона исходных данных возможно лишь при введении допущений, снижающих адекватность получаемых результатов. Одним из способов, позволяющих оценить качество заложенных алгоритмов оптимизации и информационного обмена, а также получить ряд частных статистических данных, необходимых для разработки адекватных аналитических моделей, является использование математического моделирования на базе программно-моделирующего комплекса.

Основными назначением программно-моделирующего комплекса математического моделирования является:

- формализация процессов обработки и передачи данных;
- организация выполнения и взаимодействия процессов, их взаимодействия с программным обеспечением информационно-вычислительной системы в модельном и в реальном времени;
- управление процессом решения задачи, как в диалоговом, так и в пакетном режиме работы с использованием сценариев обработки;
- оперативное отображение результатов в графическом и табличном виде;

- регистрация и обработка результатов.

## **1.6 Выводы по главе 1**

Глава посвящена вопросам формализации задачи распределения потоков целевой информации при функционировании космической системы ДЗЗ. Систему ДЗЗ предложено рассматривать как сложную, территориально-распределенную информационную систему, основной задачей которой является реализация полного цикла обслуживания, начиная с формирования заявки и заканчивая предоставлением готового тематического продукта. Однако, при анализе отечественной системы ДЗЗ выявлены недостатки, которые при планируемом существенном росте потребностей к данным ДЗЗ и наращивании орбитальной группировки будут носить критический характер. К ним, в частности, относятся:

- низкий уровень планирования процессов распределения потоков целевой информации по составным частям такой информационной системы в целом, несмотря на то, что в отдельных ее сегментах уровень планирования достаточно высок;
- концентрация процессов обработки результатов съемки производится, как правило, на одном из ППИ, выбор которого, как правило, носит регламентный характер;
- при этом, не учитываются возможности других территориально-распределенных ППИ, их текущая загруженность и разница во времени.
- учет степени текущей загруженности ППИ, с которым предполагается сеанс приема/передачи информации с КА осуществляется в «ручном» режиме, да и само понятие «степень загруженности» на данный момент носит скорее чисто интуитивный характер.

В конечном итоге, устранению этих недостатков и посвящена данная работа. В главе проведена декомпозиция космической системы ДЗЗ как сложной информационной организационно-технической системы, определены системные и потребительские характеристики ее элементов, таких как:

- космические аппараты, составляющие основу отечественной группировки ДЗЗ (существующей и перспективной), варианты их орбитального построения, целевую аппаратуру и циклограммы работы.
- наземная космическая инфраструктура, ее характеристики и функциональные возможности
- готовые информационные продукты, которые могут создаваться на базе снимков с различных КА орбитальной группировки системы в разных ПШИ;
- потребители и их заявки, включая анализ обращений к системе, предпочтения и общий заявленный объем информации, позволивший выявить факт преобладания типовых и значительной доли необслуженных заявок;

Определены основные рабочие процессы в системе, такие как:

- сбор заявок, планирование;
- передача/прием циклограмм;
- съемка и хранение на борту;
- передача/прием отснятых маршрутов;
- стандартная или тематическая обработка
- архивация и доставка тематического продукта.

Сформированы показатели эффективности системы, которые были разделены на группы:

1) Технические показатели эффективности целевого функционирования, отражающие оценки отдельных свойств системы:

- разрешение обработанных снимков;
- точность плановой привязки обработанных снимков;
- суммарный объем информации, полученной на наземный комплекс приема, обработки и распространения (НКПОР);
- суммарная отснятая площадь (производительность системы) и др.

2) Функциональные показатели эффективности системы, отражающие оценки свойств подсистем:

- вероятности обслуживания заявок в зависимости от приоритета;
- вероятности отказа в обслуживании заявок в зависимости от приоритета;
- оперативность исполнения заявок в зависимости от приоритета;
- глубина обработки отснятых маршрутов в зависимости от приоритета;
- суммарная относительная площадь, выданная потребителям, в зависимости от приоритета и др.

3) Показатели эффективности системы в целом, отражающие интегральные оценки свойств системы:

- суммарное время обслуживания заявок;
- эффективная производительность системы (суммарная относительная площадь, выданная потребителям);
- совокупная ценность продуктов обработки отснятых маршрутов;
- осредненная оперативность исполнения заявок;
- суммарный объем архивов НКПОР и др.

Все они зависят от баллистической структуры, характеристик целевой аппаратуры и наземного комплекса приема обработки и распределения информации.

Не вызывает сомнений, что использование всей совокупности показателей эффективности для решения оптимизационной задачи практически невозможно как с точки зрения вычислительной эффективности, так и с точки зрения интерпретации результатов. Поэтому обоснована возможность провести объективное свертывание вышеперечисленных показателей и перейти к двум частным, характеризующим эффективность целевого функционирования системы в целом: оперативности (времени) выполнения заявок потребителя на получение готового тематического продукта и стоимость готового тематического продукта. При этом в качестве независимых переменных для вычисления этих показателей предложено использовать системное время и объем информации, формируемый в результате выполнения заявки (трафик), а в качестве обязательных ограничений – максимально возможное число одновременно выполняющихся процессов и суммарный объем информации.

Результатом, полученным в главе является формальное представление задачи распределения потоков целевой информации при функционировании космической системы ДЗЗ как последовательности следующих операций:

- формирование заявки;
- определение перечня запросов к системе, необходимых для выполнения заявки;
- определение процессов и последовательности их выполнения, которые будут обрабатывать соответствующие запросы;
- оптимизация временного распределения процессов по элементам системы, с учетом выбранных показателей эффективности и имеющихся ограничений.

## Глава 2. Методический подход к решению задачи оптимизации распределения потоков целевой информации при функционировании космической системы ДЗЗ

### 2.1 Математическая постановка задачи оптимизации

Допустим, что заявки в систему поступают последовательно. Порядок заявки в последовательности определяется приоритетностью их обработки. Тогда удобной моделью процесса целевого функционирования спутниковой системы является граф  $\Gamma$ , который может иметь как геометрической представление (рисунок 2.1), так и математическое – в виде матриц и списков связности.

Множество вершин  $Q = \{Q_i, i = \overline{1, N}\}$  графа  $\Gamma$  формируется как совокупность множества целевых операций в системе по непосредственному обслуживанию потребителей, реализуемых в соответствующие интервалы времени.

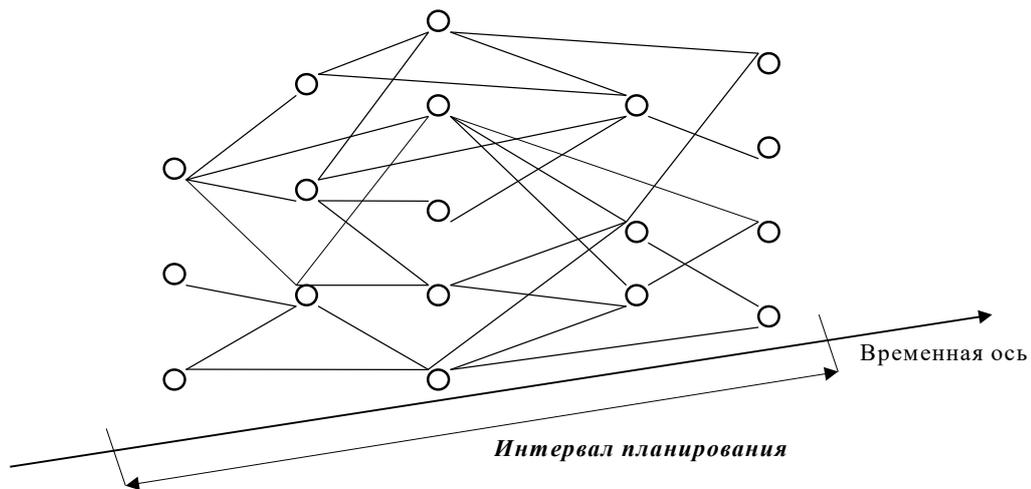


Рисунок 2.1 – Интерпретация процесса целевого функционирования  
в виде графа

Множество дуг  $L = \{L_i, i = \overline{1, N}\}$  графа  $\Gamma$  определяет его связность и формируется как совокупность множеств целевых операций КА системы, которые фиксируют очередность выполнения операций множества  $Q$ . С учетом сказанного математическое представление графа  $\Gamma$  имеет вид:

$$Q, L \Gamma = (Q, L) = (\{Q_i, i = \overline{1, N}\}, \{L_i, i = \overline{1, N}\}) \quad (2.1)$$

$Q = \{q_j, j = \overline{1, B}\}$ , где  $q_j$  - номера вершин графа  $\Gamma$ ,  $B$  - количество вершин;  
 $L = \{(q_j, q_s), j = \overline{1, B}, s = \overline{1, B}\}$ , где  $(q_j, q_s)$  - обозначение дуги графа  $\Gamma$  между вершинами  $q_j$  и  $q_s$ , если дуга между ними отсутствует, то отсутствует и пара  $(q_j, q_s)$  в множестве  $L$ . Граф  $\Gamma$  является ориентированным, ориентация дуг определяется упорядоченными парами чисел  $(q_j, q_s)$ , при этом  $(q_j, q_s) \neq (q_s, q_j), j = \overline{1, B}, s = \overline{1, B}$ ; на рисунке 2.1 ориентация дуг не показана в целях упрощения.

При целевом функционировании космической системы ДЗЗ как информационной системы заявки поступают последовательно и, следовательно, модель процесса целевого функционирования представляет собой семейство графов. Причем, в общем случае эти графы пересекаются во времени. Графическое представление такой модели представлено на рисунке 2.2.

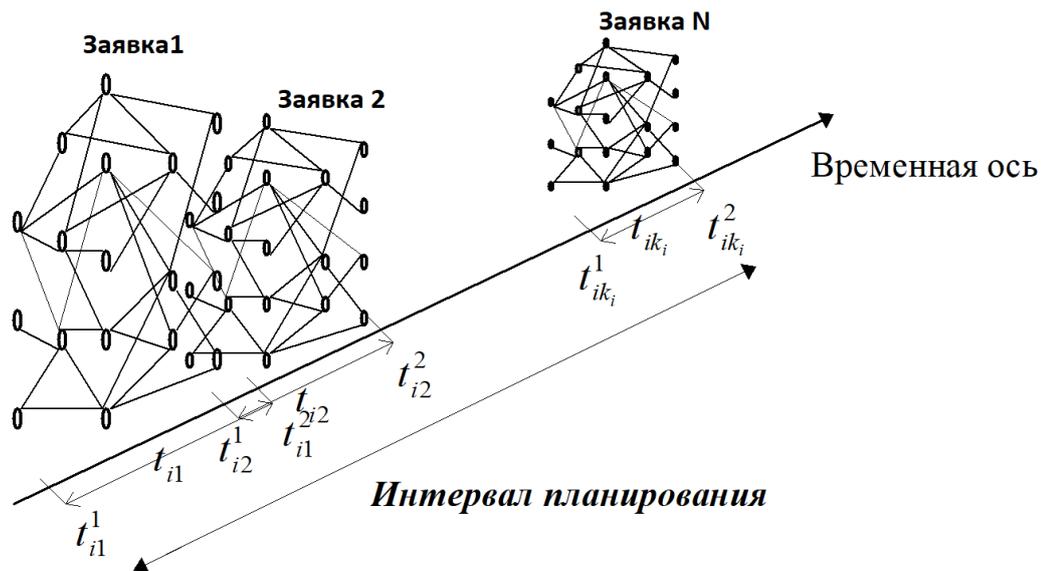


Рисунок 2.2 – Интерпретация процесса целевого функционирования  
 в виде семейства пересекающихся графов

С учетом (2.1) граф  $\Gamma$ , представленный на рис.4.2, формально записывается в виде:

$$\Gamma = \{\Gamma_k, k = \overline{1, k_i}\} = \{(Q, L)_k, k = \overline{1, k_i}\}, \quad k_i = const, i = \overline{1, N} \quad (2.2)$$

Граф  $\Gamma$  может быть формализован в виде цифровой матрицы, содержащей информацию о связности его вершин:

$$C = \begin{pmatrix} z_1^1 & m_{11} & m_{12} & \dots & m_{1z_1^1} & \dots & 0 & z_1^2 & n_{11} & n_{12} & \dots & n_{1z_1^2} & \dots & 0 \\ \dots & \dots \\ z_i^1 & m_{i1} & m_{i2} & \dots & \dots & \dots & m_{iz_i^1} & z_i^2 & n_{i1} & n_{i2} & \dots & \dots & \dots & n_{iz_i^2} \\ \dots & \dots \\ z_q^1 & m_{q1} & m_{q2} & \dots & m_{qz_q^1} & \dots & 0 & z_q^2 & n_{q1} & n_{q2} & \dots & n_{qz_q^2} & \dots & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} z_i^1 & m_{i1} & \dots & m_{iz_i^1} & \dots & 0 & z_i^2 & n_{i1} & \dots & n_{iz_i^2} & \dots & 0 \end{pmatrix}, i = \overline{1, q}, \quad (2.3)$$

где  $q$  - количество строк матрицы  $C$ , которое либо равно полному количеству вершин графа  $\Gamma$  (или количеству элементов множества  $\mathcal{O}$ ), либо равно такому количеству вершин, которое достаточно для исчерпывающего цифрового описания графа; элементы  $z_i^2, z_i^1, i = \overline{1, q}$  определяют количество целевых операций системы, переход к выполнению которых возможен после выполнения  $i$ -ой операции, - элементы  $z_i^2$  относятся к операциям по непосредственному обслуживанию информационных источников, элементы  $z_i^1$  - к служебным операциям, необходимым для выполнения операций по непосредственному обслуживанию информационных источников; элементы  $m_{is}, i = \overline{1, q}, s = \overline{1, z_i^1}$ , представляют собой номера компонентов космического или наземного сегментов системы, с которыми осуществляют взаимодействие КА при выполнении служебных операций; элементы  $n_{is}, i = \overline{1, q}, s = \overline{1, z_i^2}$  представляют собой номера информационных источников, обслуживаемых КА системы при выполнении целевых операций. Матрица  $C$  имеет размерность  $[q \times q_c], q_c = 2 + \max_i (z_i^1, i = \overline{1, q}) + \max_i (z_i^2, i = \overline{1, q})$ . Если для некоторой  $i$ -ой строки матрицы  $C$  выполняется условие  $z_i^1 < \max_i (z_i^1, i = \overline{1, q})$  или  $z_i^2 < \max_i (z_i^2, i = \overline{1, q})$ , то в нее включаются дополнительные нулевые элементы, доопределяющие матрицу  $C$  до прямоугольной.

Математическое представление графа  $\Gamma$  (2.2) имеет вид трехмерной матрицы:

$$C = \{C_k, k = \overline{1, k_i}\} = \left\{ \left\| \begin{array}{cccccccc} z_s^1 & m_{s1} & \dots & m_{sz_1} & \dots & 0 & z_s^2 & n_{s1} & \dots & n_{sz_2} & \dots & 0 \end{array} \right\|, s = \overline{1, q} \right\}, k = \overline{1, k_i} \quad (2.4)$$

$k_i = \text{const}, i = \overline{1, N}.$

Способ представления информации (2.3) или (2.4) позволяет компактно интерпретировать граф  $\Gamma$  в математическом виде и конструктивно моделировать процесс целевого функционирования как отдельно взятого КА, так и космической системы в целом [24].

Пара матриц (2.3) и (2.4) является математической моделью для организации процедуры маршрутизации на графе (2.1) или (2.2) соответственно с целью распределения потоков целевой информации формирования и оптимизации временной последовательности выполнения операций (ВПВО) по выбранным в п. 1.4 критериям. Заметим, что матрицы  $C$  могут состоять из элементов, характеризующих целевые операции связанные с выполнением рабочих процессов в узлах системы, что, в свою очередь, определяется физическим смыслом прикладной задачи планирования и ее технической постановкой.

В предыдущей главе в п. 1.4, 1.5 представлено формальное представление последовательности решения задачи оптимизации, выбраны показатели эффективности и сформулирована техническая постановка задачи.

Представление решения задачи как последовательности выполнения процессов обработки позволяет сформулировать перечень взаимосвязанных математических моделей требующих дальнейшей разработки, а именно:

- модель заявки потребителя;
- единую модель процесса обработки информации космическим сегментом;
- единую модель обработки информации наземным сегментом;
- модель передачи данных.

Каждая из этих моделей должна на входе иметь некий объем информации, преобразовывать его (уменьшать или увеличивать) вычислять системные показатели эффективности – время, требуемое для реализации процесса и его условную стоимость.

Для того чтобы методы и алгоритмы имели одинаковые схемы реализации, а модели процессов целевого функционирования имели общность в способах

формирования и представления информации необходимо все расчеты осуществлять на одинаковом множестве независимых параметров. Учитывая тот факт, что рассматриваемая система является информационной системой, элементы которой функционируют во времени, которое напрямую зависит от объемов обрабатываемой и передаваемой информации, то в качестве независимых параметров были выбраны:

- системное время;
- условный объем информации (трафик).

Модель процесса обработки информации элементом космического сегмента (КС) может быть представлена (см. рисунок 2.3) в виде функции генерации трафика, входом которой являются параметры заявки, такие как география района съемки и его площадь, требования к качеству снимков и типам съемочной аппаратуры, а также приоритетность выполнения заявки.



Рисунок 2.3 – Модель процесса обработки информации  
(космический сегмент)

Входные данные определяются потребителем (см. п.1.2.5) и включают в себя:

- географические данные по району(нам) наблюдения;
- тип используемой аппаратуры наблюдения;
- приоритет заявки (обычная или важная).

Ограничениями при расчете частных показателей эффективности являются:

- максимальное количество одновременно выполняемых процессов – 1;

- ограничение на максимальный объем информации, связанное с возможностями БЗУ;
- возможность выполнения маневра по крену для увеличения полосы обзора.

При вычислении показателей эффективности вводятся следующие допущения:

- возможно одновременное включение аппаратуры разного типа;
- во время включения возможно проведение наблюдений в интересах других заявок, если это не связано с переориентацией линии визирования;
- после передачи информации на наземный сегмент происходит ее удаление из БЗУ и счетчик количества процессов переводится в 0.

В состав наземного комплекса приема, обработки и распространения информации входят программно-аппаратные средства обеспечивающие прием/передачу данных между КА и ППИ, для которых известны:

- угол «маски» – минимальный угол между направлением на спутник и плоскостью местного горизонта, при котором возможна передача информации;
- возможность обслуживания КА имеющимися программно-аппаратными средствами;

Для расчета оперативности обработки и стоимости района наблюдения, представленного в заявке, для каждого КА необходимо уметь вычислять:

- множество возможных моментов времени начала и продолжительность съемки;
- множество возможных моментов времени начала и продолжительность сеансов связи.

Эти расчеты могут быть проведены, если имеется взаимно-однозначное соответствие между параметрами целевой аппаратуры КА и требованиями, изложенными в заявке, а также между характеристиками приемно-передающей аппаратуры КА и ППИ.

Выходом является созданный объем первичной информации, получаемой с КА. Такой подход предполагает наличие следующих согласованных между собой математических моделей:

- модели спутниковой группировки;
- модели наземных пунктов приема и передачи информации;
- модели аппаратуры наблюдения;
- модели эволюции спутниковой группировки.

Формально (с точностью до способов формирования функций  $F$ ,  $T$ ,  $C$ ), предлагаемая модель подходит для описания процесса, связанного с поиском в архивах. В обоих случаях, цель данного процесса – сгенерировать начальный объем информации для дальнейшей ее прохождения по элементам инфраструктуры и инициировании изменения затрат времени и увеличения условной стоимости.

Укрупненно, модель процесса обработки информации элементом НКПОР можно представить как взаимосвязанную последовательность функций  $F_{III}^p$  изменения условного объема информации при применении к ней соответствующего процесса обработки (функцию изменения трафика, см. рисунок 2.4):

ППИ  $\rightarrow$  Процесс  $_1 \rightarrow \dots \rightarrow$  Процесс  $_N \rightarrow$  Потребитель

где Процесс $_i$  представляет собой:

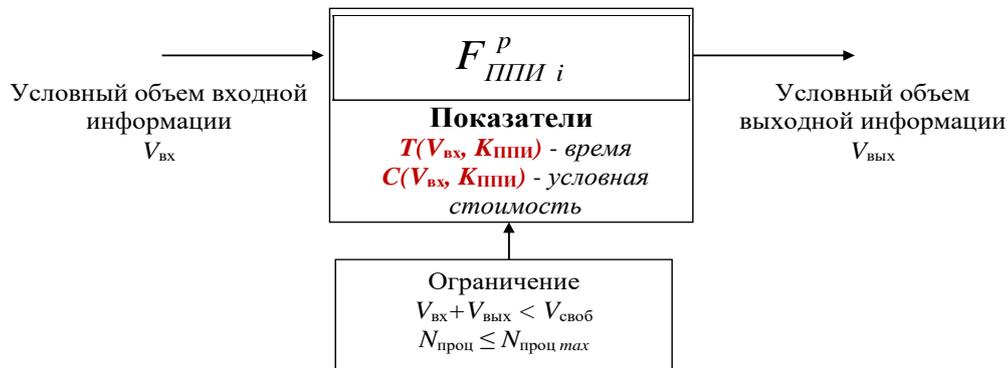


Рисунок 2.4 – Модель процесса обработки информации  
(наземный сегмент)

Функция зависит от объема входной информации и производительности наземного ППИ. В простейшем случае производительность может быть задана в виде повышающего или понижающего коэффициентов  $K_{ППИ}$ .

Ограничениями при расчете частных показателей эффективности здесь являются:

- максимальное количество одновременно выполняемых процессов;
- ограничение на максимальный объем информации;

Как следует из формы описания предложенных моделей ( см. рисунки 2. и 2.) независимыми параметрами в них являются: системное время и объем информации (трафик) в системе.

Таким образом, если имеется сформированная заявка, для выполнения которой выбран соответствующий кластер КА и математически описаны все процессы ее обработки, то все возможные варианты расчета показателей эффективности выполнения заявки образуют направленный граф (рисунок 2.5)

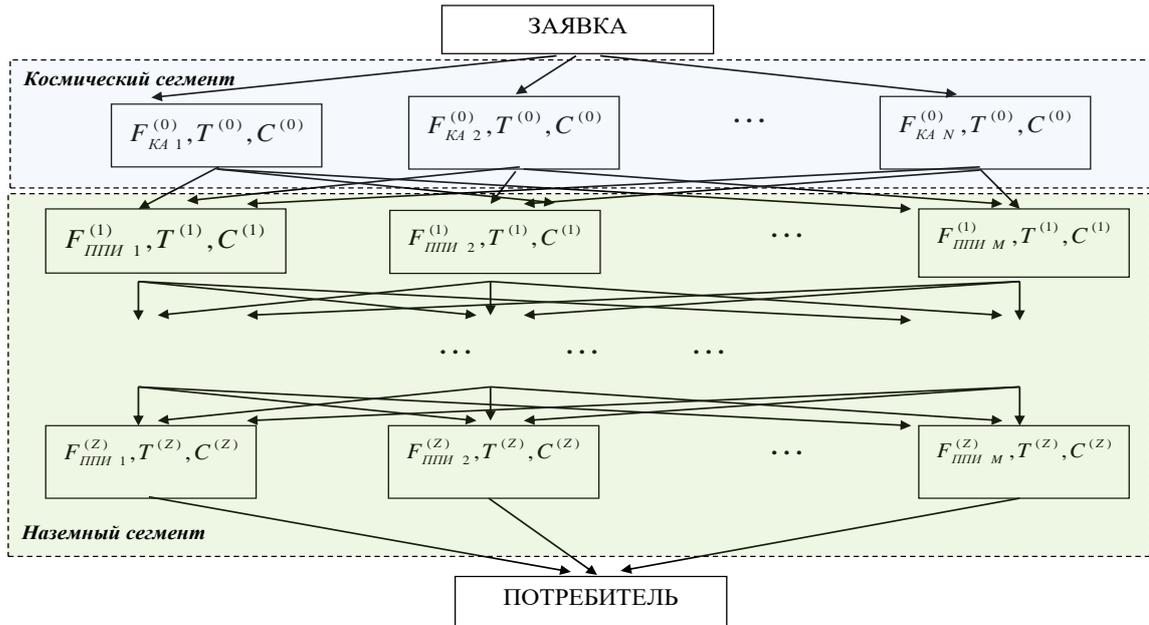


Рисунок 2.5 – Граф возможных вариантов выполнения заявки

Вершиной графа является заявка. Формализованные данные заявки передаются на элементы космического сегмента. Напомним (см. п.1.4), что условный объем информации (трафик) был принят нами в качестве одной из независимых переменных, на основе которых производятся определение изменения трафика при выполнении процесса, а также вычисляются частные показатели эффективности. Системное время, как независимая переменная, используется как при вычислении частных показателей эффективности, так и при проверке ограничений в при обслуживании заявок.

Далее представлены процессы обработки в НКПОР, каждый уровень соответствует процессу, который может быть выполнен на том или ином ПШИ.

На нижнем уровне находится потребитель. Предполагается, что он для конкретной заявки единственный и все заключительные процессы обработки завязаны на нем [37].

Характеристики каналов связи между узлами считаются известными, по ним мы можем определить время и стоимость передачи информации.

Из-за отсутствия горизонтальных связей структура графа достаточно проста. Это, с одной стороны, значительно упрощает решение оптимизационной задачи, а

с другой – приводит к необходимости дополнения алгоритма работы с учетом появления более приоритетной или экстренной заявки.

Прохождение трафика по графу приведет к вычислению системных показателей.

Таким образом, возникает задача оптимизации распределения процессов обработки с учетом возможности вычисления представленных выше системных показателей, или их свертки, при наличии текущих ограничений. Эта задача может быть интерпретирована как задача оптимизации маршрута на взвешенном графе. Результат решения оптимизационной задачи должен быть зарегистрирован в системе в виде новых ограничений и использован при расчете маршрутов последующих заявок.

## **2.2 Общий подход к решению задачи**

### **2.2.1 Методический подход к решению задачи оптимизации маршрута**

Как следует из постановки, задача оптимального распределения целевой информации с разнотипных КА ДЗЗ по составным частям системы является многокритериальной. В связи с тем, что число критериев невелико, то для ее решения можно воспользоваться классическим математическим аппаратом многокритериальной оптимизации, предварительно адаптировав их к условиям функционирования. Это позволит определить и выработать наиболее предпочтительные варианты распределения целевой информации с разнотипных КА ДЗЗ по составным частям системы. Таким образом, целью является принятие решений в условиях многокритериальной неопределенности, позволяющей

- рассматривать множество всех допустимых способов учета неопределенности,
- формировать комплексную оценку решений в условиях неопределенности, используя любые известные и неизвестные свертки,
- рассматривать как количественные, так и качественные критерии,
- использовать интервальные оценки частных критериев,

- не задавать весовые коэффициенты (они считаются неопределенными),
- устанавливать предпочтения между отдельными критериями.

В том случае, если число процессов и доступных ППИ для обработки заявки невелико, то задача оптимального распределения может быть решена методом перебора. Кроме того, возможно применение одного из классических методов:

- метод сведения к однокритериальной задаче с использованием линейной свертки критериев [71];
- метод поиска Парето-оптимальных решений [71];
- метод последовательных назначений [8, 60];
- метод случайной оптимизации [71].

Линейная свертка состоит в переходе от  $m$  критериев  $f_i(x)$ ,  $i = \overline{1, m}$ , к одному критерию  $f(x)$  вида [71]

$$f(x) = \sum_{i=1}^m \alpha_i f_i(x), \quad (2.5)$$

где  $\alpha_i$  - некоторые весовые коэффициенты, характеризующие значимость соответствующего критерия и устанавливающие определенный компромисс между ними за счет ранжирования целей по их важности. Обычно весовые коэффициенты  $\alpha_i$  выбираются положительными и нормированными тем или иным способом, например,  $\sum_{i=1}^m \alpha_i = 1$ ,  $\alpha_i \geq 0$ .

Следует подчеркнуть, что назначение коэффициентов  $\alpha_i$  и является той дополнительной гипотезой, которая сводит исходную задачу с многими критериями к задаче с одним критерием. Сам процесс назначения  $\alpha_i$  является неформальным актом. Он требует проведения тщательной проработки смысловой составляющей самой задачи. Коэффициенты  $\alpha_i$  часто назначаются путем последовательных приближений после предварительного решения задачи при различных значениях  $\alpha_i$ .

Строго говоря, оба рассмотренных способа редукции к однокритериальной задаче взаимно связаны, так как взаимно связаны назначения допустимых границ для критериев  $f_i^*$  в первом способе и выбор коэффициентов  $\alpha_i$  во втором способе. Практически же такое соответствие установить не всегда удастся. Поэтому к назначению  $\alpha_i$  часто приходится прибегать с помощью экспертов.

В случае использования линейной свертки критериев или оптимизации лишь по одному показателю, для решения можно предложить следующие эффективные алгоритмы:

- алгоритм Дейкстры [56, 76];
- простой или направленный перебор [80].

Основой метода Парето является формирование множества Парето и принятие решения о выборе в нем наиболее предпочтительного. В нашем случае, когда число критериев минимально и равно двум, по-видимому, наиболее эффективным вариантом служит представление всего множества Парето в виде графика, что позволяет проанализировать последствия всех возможных эффективных решений. Это не обеспечивает полного решения задачи, так как по-прежнему остается множество альтернатив, для которых еще необходимо выбрать единственное наилучшее. Одним из современных путей развития Парето-оптимальных методов многокритериальной оптимизации состоит в том, чтобы предоставить возможность опираться на все множество допустимых способов учета неопределенности, что, однако, требует больших вычислительных ресурсов. Такой подход был реализован в методе ПРИНН [63, 80].

### **2.2.2 Методический подход к формированию и использованию математических моделей рабочих процессов**

На основе изучения методов, алгоритмов решения задач оптимизации оперативного планирования целевого функционирования систем наблюдения и

связи в различных постановках [80] и предложенного формализма, позволила выработать единый методический подход к их решению.

Во-первых, можно заметить, что предлагаемые для решения численные методы и алгоритмы являются стандартными при минимальной адаптации к рассматриваемой предметной области, что позволяет достаточно легко выполнить их программную реализацию.

Во-вторых, предложенная формализация моделей процессов обработки заявки также иллюстрирует общность в способах их формирования и программной реализации.

Наконец, в-третьих, реализация последовательности «модель-алгоритм-оптимизация» также свидетельствует о возможности выработать единый методический подход.

В основе предлагаемого методического подхода лежит последовательное выполнение четырех основных этапов вычислений (расчетов), укрупненная блок-схема которых представлена на рисунке 2.6.

**Первый этап** – моделирование динамики орбитальной группировки КА ДЗЗ. Целью является исследование взаимного расположения космических аппаратов и ППИ на всем интервале планирования. Определяется множество интервалов времени доступных для проведения сеансов съемок и приема-передачи информации с учетом эволюции орбит и необходимости вывода КА на техническое обслуживание. Рассчитываются параметры для управления бортовой целевой аппаратурой.

Исходными данными являются:

- параметры орбиты КА,
- характеристики целевой аппаратуры,
- циклограммы работы отдельно взятых КА ОГ ДЗЗ
- информация о НКПОР (географическое расположение, зоны радиовидимости ППИ и др.).

К внешним условиям относятся:

- условия освещенности и наличие теней в районе съемки,

- облачность в районе съемки,
- совместимость радиочастотных диапазонов приема-передачи информации,
- и др.

Необходимо отметить, что для проведения исследований необходимо использовать

- упрощенные модели, которые позволяют интегрировать уравнения движения как без учета внешних управляющих воздействий, так и при использовании наиболее значимых;
- полные модели, учитывающие весь спектр возмущений, для расчетов орбитального движения КА на длительных интервалах времени вплоть до периода их активного существования.

Результатом первого этапа являются:

- возможные интервалы времени проведения съемки и их продолжительность
- возможные интервалы проведения сеансов связи с наземными ППИ, их продолжительность и объем информации;
- условная стоимость реализации процесса съемки как параметров заявки потребителя.

**Второй этап** – формирование модели КА и элементов НКПОР, как взаимосвязанных составных частей функционирования космической системы ДЗЗ, представляющей собой модель планирования с учетом специфики сценария ее целевого функционирования и постановки оптимизационной задачи. На этом этапе используются и обобщаются результаты выполнения предыдущего этапа в виде параметров математической модели.

Такая модель служит основой для реализации процедуры формирования (поиска) плана целевого функционирования. Элементы модели, по существу, выражают значения показателей эффективности выполнения целевых операций КА системы (см. п.1.4), а также возможность или отсутствие возможности

потенциальных переходов между двумя последовательными процессами с учетом имеющихся ограничений.

**Третий этап** – решение задачи оптимизации распределения целевой информации по элементам (узлам) системы. Проводится синтез временной последовательности выполнения операций на основе модели первого и второго этапа. Следует отметить, что на данном этапе допускается возможность существования нескольких (или множества) планов, что особенно характерно для задач многокритериальной оптимизации.

Реализовать процедуру формирования оптимального плана можно с применением одного из классических, например, рассмотренных в п. 2.2.1 методов, либо специально разработанных методов оптимизации.

Результатом выполнения рассматриваемого этапа методического подхода является один (или набор) оптимальных (близких к оптимальному) планов распределения целевой информации по узлам системы.

**Четвертый этап** – многократное решение задачи распределения потоков информации в целях проведения системных исследований. На этом этапе осуществляется многократное решение задачи управления при различных вариантах исходных данных, в качестве которых могут выступать параметры орбит КА ОГ ДЗЗ, характеристики бортовой аппаратуры КА, параметры и расположение элементов НКПОР, требования потребителей к результатам тематической обработки и т.д.. Результаты многократного решения задачи позволяют выявить зависимости показателей эффективности целевого функционирования при реализации предложенного программно-математического подхода, т.е. провести параметрический анализ целевого функционирования системы в целом.

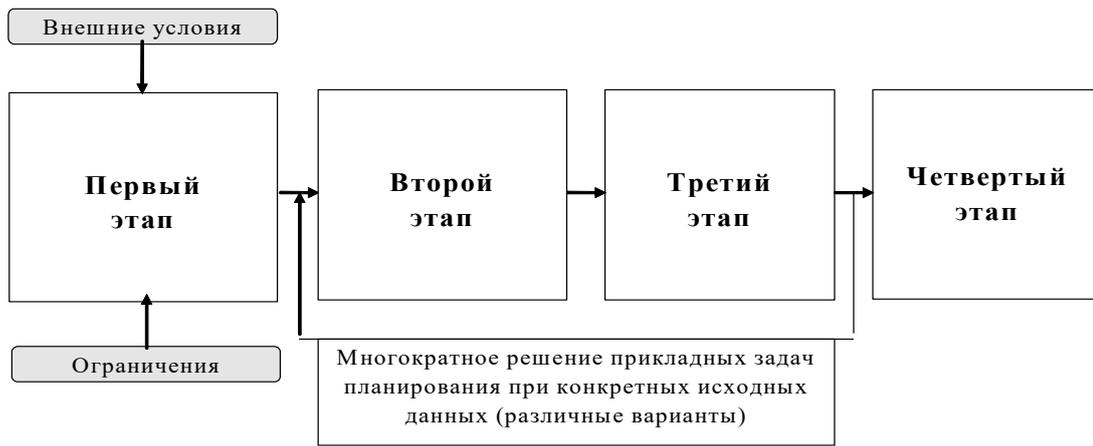


Рисунок 2.6 – Блок-схема реализации единого методического подхода к формированию и использованию математических моделей

Таким образом, можно сказать, что предлагаемый подход к формированию и использованию математических моделей при решении прикладных задач оптимизации распределения потоков целевой информации является системным, а для доведения перечисленных выше этапов до практического использования необходимо формирование соответствующих математических моделей, численных методов, алгоритмов и программного обеспечения. Этому и посвящены последующие главы данной работы.

### **2.3 Анализ условий применимости предлагаемого методического подхода**

Условия применимости предлагаемого методического подхода можно разбить на две группы

- условия применения методического подхода к решению поставленной задачи;
- условия применимости исходных данных.

#### **2.3.1 Условия применимости методического подхода к решению поставленной задачи**

В работе предложено перейти от решения общей сложной задачи оптимального распределения целевой информации по составным частям

космической системы ДЗЗ к более простой – последовательной оптимизация маршрута прохождения заявки по ее элементам с известными промежуточными узлами для обработки, сохранения/считывания информации.

Такой переход возможен, если выполняются следующие условия:

- сценарий обработки заявки выполняется последовательно, недопустим возврат или откат на предыдущие этапы;
- процесс не может быть распараллелен, т.е. при формировании процесса необходимо руководствоваться принципом атомарности, а распараллеливание необходимо формировать за счет усложнения его математической модели;
- параметры заявки не изменяются на всем интервале планирования;
- выполнение сценария по заявке не может быть прервано, результаты доступны потребителю только после окончания обработки и формирования технологической карты;
- информационная система функционирует идеально, без искажения информации и возможных технических неполадках;
- при невозможности немедленно отправить заявку на обслуживание по причине полной загруженности необходимых КА или ППИ она ставится в очередь;
- при обнаружении в процессе обработки заявки того факта, что в последующем узле ресурсов для ее обработки недостаточно, то после завершения процесса обработки она остается в режиме ожидания освобождения там соответствующих ресурсов.

Под ресурсами в данном случае понимаются ограничения, при вычислении функций  $F_{КА j}^p$  и  $F_{ППИ i}^p$ .

### **2.3.2 Условия применимости математических моделей и исходных данных**

В качестве необходимых условий применимости математических моделей в задачи оптимизации распределения целевой информации можно выделить следующие:

- максимальное приближение параметров математических моделей к реальным значениям, которые могут быть получены разными способами, например, привлечением соответствующих экспертов, обработки имеющейся статистики (если она есть) или путем дополнительного моделирования;
- математическое описание процессов и расчета показателей эффективности и связанная с этим их программная реализация должны обязательно учитывать вычислительные затраты на их реализацию;
- корректность и актуальность исходных данных, необходимых при реализации всех моделей, включая модели стоимостные модели, модели вычислительных средств и линий связи, а также способов их пересчета в соответствующие параметры математической модели.

На начальном этапе практического применения полученных в работе решений, при отсутствии объективных источников, необходимо привлечение экспертов, а в дальнейшем – использование накопленной статистики.

### **2.4 Математические модели функционирования составных частей космической системы ДЗЗ в задаче распределения целевой информации**

В соответствии с предложенным методическим подходом основой для процессов распределения заявок является оптимизация системных показателей времени и совокупных затрат (условной стоимости) на обработку информации, которые для  $j$ -й заявки и  $q$ -го маршрута рассчитываются аддитивно (2.6), (2.7) и включает в себя этапы прохождения информации по узлам информационной системы и линиям связи (ЛС) (Таблица 2.1):

$$T_{\text{обсл } jq} = T_{jq \text{ КА}} + T_{jq \text{ НКИ}} + T_{jq \text{ ЛС}} \quad (2.6)$$

$$C_{jq} = C_{jq \text{ КА}} + C_{jq \text{ НКИ}} + C_{jq \text{ ЛС}} \quad (2.7)$$

Таблица 2.1 – Этапы обслуживания единичной заявки по узлам системы

Узел	Этап
НКИ	поступление заявки в систему;
	готовность циклограммы;
	передача циклограммы;
КА	окончание передачи циклограммы;
	начало съемки с допустимой безоблачной долей заданного района
	окончание съемки, назначенный циклограммой при условии, что количество облачности над районом съемки не превышает допустимое; считается, что к этому моменту снимок маршрута сохранен в БЗУ или
	окончания выгрузки данных из архива;
	передача данных на ППИ, определенном циклограммой;
	окончание передачи данных на ППИ, определенном циклограммой;
НКИ	начало тематической обработки данных на первом ППИ, определенном циклограммой;
	окончание тематической обработки данных последнем ППИ, определенном циклограммой;
	начало архивации конечного продукта на ППИ, определенном циклограммой;
	окончание архивации конечного продукта на ППИ, определенном циклограммой;
	начало доставки конечного продукта от ППИ, определенного циклограммой, до потребителя
	окончание доставки конечного продукта от ППИ, определенного циклограммой, до потребителя.

Такая группировка служит основой для формирования соответствующих математических моделей:

- модель заявки потребителя;
- модель орбитальной группировки, включающую в себя модель эволюции и коррекции КА ОГ ДЗЗ, наблюдения и сброса информации;
- модели КА и НКПОР как составной части информационной системы;
- модель передачи информации между узлами системы.

Таким образом, декомпозиция позволяет сформировать единую систему взаимосвязанных математических моделей (рисунок 2.7), разработке которых посвящены последующие главы работы.

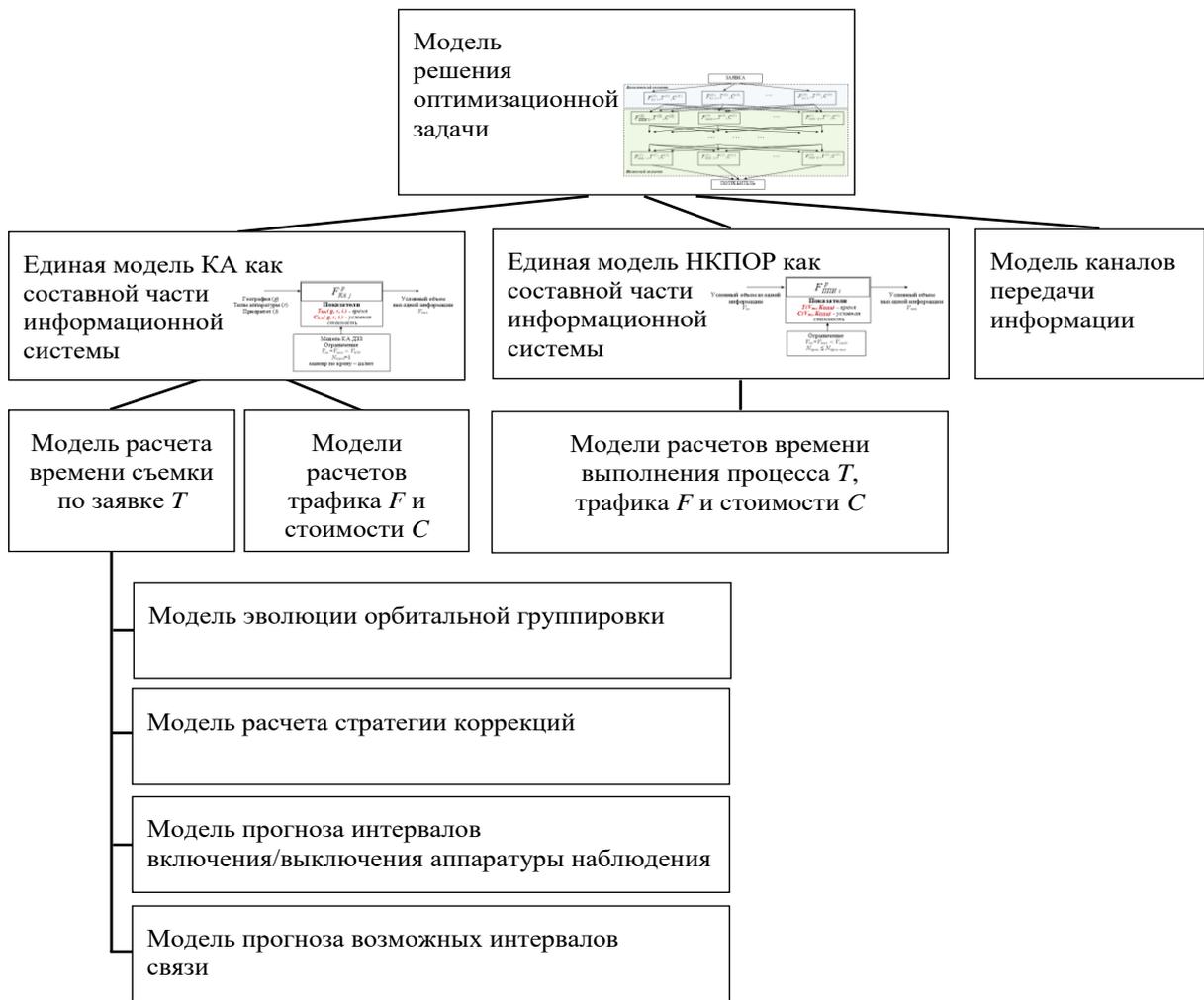


Рисунок 2.7 – Система взаимосвязанных моделей

## 2.5 Модель заявки потребителя

Каждая заявка, поступающая на вход системы, регистрируется с записью даты и времени поступления с присвоением ей индивидуального номера. При формировании заявки потребителем считаются известными следующие атрибуты:

- сценарий обработки, включающий в себя способы расчета показателей времени и стоимости по каждому процессу;
- возможностей ППИ выполнению соответствующих процессов;
- дата, время поступления заявки;
- объем и состав входной информации;

- предпочтение по выбору оптимизационной процедуры;
- дополнительная атрибутивная информация.

На основе заявки можно сформировать набор последовательных запросов к системе, составляющих сценарий обработки заявки. В свою очередь, каждому запросу из сценария соответствует свой вычислительный процесс обработки.

Процесс может описывать:

- проведение съемки заданного района(ов);
- поиска в данных в архиве;
- вычислительной задачи;
- сохранение данных;
- передачу данных и т.д.

Учитывая взаимосвязанность атрибутов заявки между собой можно выделить основные, которые необходимо включить в разрабатываемую модель, а именно:

- географическое расположение потребителя;
- тип(ы) аппаратуры наблюдения;
- список процессов обработки и их последовательность;
- географическое расположение районов съемки;
- приоритет.

При этом, географическое расположение районов съемки удобно задавать в виде полигонов в земной системе координат. Полигоны могут быть заданы как таблично, так и (в более общем случае) в виде двухцветного растрового рисунка. Во втором случае точность формирования района наблюдения будет зависеть от размеров это рисунка (количества условных пикселей).

Обобщенный алгоритм обработки заявки включает последовательное выполнение ряда процедур:

- 1) определение интервалов поступления спутниковой информации на ППИ или поиск в архиве данных,
- 2) определение наземных ППИ, способных осуществить обработку снимка до затребованного уровня обработки,

- 3) выбор ППИ-обработчиков в соответствии с решающим правилом и добавление, при необходимости, соответствующего задания в циклограмму работы этого ППИ,
- 4) передача, при необходимости, снимка от ППИ-приемника к ППИ-обработчику,
- 5) выполнение обработки снимка до заказанного потребителем уровня,
- 6) передача готового продукта потребителю.

Для принятия решений при выполнении процедур оператор системы использует установленную заранее политику распределения вычислительных ресурсов, которая определяет совокупность запретов и приоритетов на получение, хранение и выдачу информации потребителям.

## **2.6 Выводы по главе 2**

В главе предложен общий методический подход к решению поставленной технической задачи, который включает в себя:

- формулировку математической постановки оптимизационной задачи;
- выбор общего подхода к решению задачи;
- анализ условий применимости.

Для того, чтобы сформулировать математическую постановку задачи оптимизации необходимо наличие взаимосвязанных моделей:

- модель заявки потребителя;
- единую модель процесса обработки информации космическим сегментом;
- единую модель обработки информации наземным сегментом;
- модель передачи данных.

Каждая из этих моделей на входе имеет некий объем информации, осуществляет его преобразование (уменьшение или увеличение) и вычисляет системные показатели эффективности – время, требуемое для реализации процесса и его условную стоимость.

В свою очередь, модель процесса обработки информации космическим сегментом включает в себя:

- модель спутниковой группировки;
- модель наземных пунктов приема и передачи информации;
- модель аппаратуры наблюдения;
- модель эволюции спутниковой группировки.

Модель обработки информации наземным сегментом можно представить как взаимосвязанную последовательность функций изменения условного объема информации при применении к нему соответствующего процесса обработки (функцию изменения трафика).

На основе модели передачи данным можно сформировать матрицу связанности элементов систем между собой и сформулировать математическую постановку задачи, которая, в конечном счете, сводится к необходимости двухкритериальной оптимизации маршрута прохождения заявки по графу.

В качестве подходов к решению задачи двухкритериальной оптимизации предложено использовать традиционные: линейную свертку критериев и использование метода Парето. Выбор методов решения основывался на их простоте и возможности интуитивно понятной интерпретации результатов.

Сформулированы условия применимости методического подхода, основными из которых являются:

- сценарий обработки заявки не предполагает возвращения на предыдущие этапы и не содержит параллельных процессов;
- обработка заявки не может быть прервана, потребителю передаются результаты после выполнения всех процессов, запланированных в сценарии обработки;
- вычислительная среда функционирует идеально;
- возможно формирование очередей на выполнение процесса, при этом время ожидания не ограничено.

В заключении сформируем перечень математических моделей, требующих разработки:

- модель заявки потребителя;

- модель орбитальной группировки, включающую в себя модель эволюции и коррекции КА ОГ ДЗЗ, наблюдения и сброса информации;
- модели КА и НКПОР как составной части рассматриваемой информационной системы;
- модель передачи информации между узлами системы,

одна из которых (модель заявки потребителя), представлена в данной главе, а остальные – в последующих.

### Глава 3. Математические модели орбитальной группировки

Совокупность математических моделей орбитальной группировки в контексте решения поставленной задачи должна позволить рассчитать время  $T_{jq}$  КА, необходимое для выполнения съемки заданного потребителем района(ов) наблюдения с заявленными характеристиками и передачи полученной информации элементам НКИ для дальнейшей обработки.

В свою очередь, для расчетов времени и стоимости необходимо сформировать:

- модель эволюции орбиты КА ДЗЗ;
- модель прогноза возможных интервалов коррекции КА для поддержания номинальных параметров орбиты (стратегии коррекций);
- модель прогноза возможных интервалов времени циклов включения/выключения аппаратуры наблюдения;
- модель прогноза возможных интервалов времени для сброса полученной информации на ППИ;

Результатом применения вышеперечисленных моделей должны стать:

- множество интервалов времени вывода КА на техобслуживание, связанное с необходимостью поддержания требуемой конфигурации орбиты;
- множество возможных интервалов времени проведения сеансов связи ППИ→КА;
- множество возможных интервалов времени проведения наблюдений заданного(ых) района;
- множество возможных интервалов времени проведения сеансов связи КА→ППИ;

При этом, набор перечисленных множеств, за исключением того, что напрямую зависит от параметров заявки потребителя, может быть рассчитан заранее на весь интервал планирования.

### **3.1 Модель движения в задаче определения и прогнозирования состояния КА**

#### **3.1.1 Уравнения движения КА**

Для моделирования динамики движения космического аппарата необходимо провести выбор основной и вспомогательных систем координат. Это вызвано тем, математические модели различных возмущений и векторы исходных данных к ним как правило формируются в разных системах (орбитальной, инерциальной, связанной и т.д.). Это приводит к тому, что в любой момент времени и на любом шаге моделирования основному вектору состояния космического аппарата должны соответствовать его вектора состояния, пересчитанные в соответствующие системы координат. Имеющийся у автора опыт и анализ других источников показывает, что такими системами должны быть:

- геоцентрическая экваториальная система координат
- гринвичская вращающаяся экваториальная система координат (ГрЭСК);
- связанная система координат;
- орбитальная система координат;
- элементы орбиты КА.

Преобразования, связанные с переходами от одной из перечисленных систем координат к другой хорошо известны и приведены, например, в [77, 94, 95, 111].

Одним из необходимых условий применимости предлагаемого методического подхода является вычислительная эффективность моделей и алгоритмов. В связи с этим основной моделью при описании пространственного движения космического аппарата может быть представление в оскулирующих элементах, поскольку при незначительной потере точности позволяет интегрировать систему с достаточно большим шагом. Сама система дифференциальных уравнений для описания пространственного движения космического аппарата в оскулирующих элементах имеет вид [77, 94, 95, 110]

$$\begin{aligned}
\frac{dp}{dt} &= 2r\sqrt{\frac{p}{\mu}} \sum g_y \\
\frac{de}{dt} &= \sqrt{\frac{p}{\mu}} \left\{ \sin \vartheta \sum g_x + \left[ \cos \vartheta + \frac{r}{p}(\cos \vartheta + e) \right] \sum g_y \right\} \\
\frac{d\Omega}{dt} &= \frac{r}{\sqrt{\mu p}} \frac{\sin u}{\sin i} \sum g_z \\
\frac{di}{dt} &= \frac{r}{\sqrt{\mu p}} \cos u \sum g_z \\
\frac{d\vartheta}{dt} &= \frac{\sqrt{\mu p}}{r^2} + \frac{\cos \vartheta}{e} \sqrt{\frac{p}{\mu}} \sum g_x - \frac{\sin \vartheta}{e} \left( 1 + \frac{r}{p} \right) \sqrt{\frac{p}{\mu}} \sum g_y \\
\frac{du}{dt} &= \frac{\sqrt{\mu p}}{r^2} - \frac{r}{\sqrt{\mu p}} \frac{\sin u}{\tan i} \sum g_z
\end{aligned} \tag{3.1}$$

где  $r = \frac{p}{1 + e \cos \vartheta}$  - расстояние от центра Земли до спутника;  $\mu = 398601,3 \text{ км}^3/\text{с}^2$  - гравитационная постоянная Земли;  $\sum g_x$ ,  $\sum g_y$ ,  $\sum g_z$  - суммы проекций возмущающих и управляющих ускорений на оси  $X_s Y_s Z_w$ .

Составляющие  $g_x$ ,  $g_y$  и  $g_z$  от возмущающей функции  $R$ , входящие в систему уравнений движения спутника имеют следующий вид [77, 94, 95]:

$$\begin{aligned}
g_x &= \frac{\partial R}{\partial r}, \\
g_y &= \frac{\cos u \sin i}{r \cos \varphi} \frac{\partial R}{\partial \varphi} + \frac{\cos i}{r \cos^2 \varphi} \frac{\partial R}{\partial \lambda}, \\
g_z &= \frac{\cos i}{r \cos \varphi} \frac{\partial R}{\partial \varphi} - \frac{\cos u \sin i}{r \cos^2 \varphi} \frac{\partial R}{\partial \lambda}.
\end{aligned} \tag{3.2}$$

Как видно, они линейны относительно частных производных возмущающей функции  $\frac{\partial R}{\partial r}$ ,  $\frac{\partial R}{\partial \varphi}$  и  $\frac{\partial R}{\partial \lambda}$ . Следовательно, суммы проекций возмущающих и

управляющих ускорений  $\sum g_x$ ,  $\sum g_y$ ,  $\sum g_z$  можно представить в виде:

$$\begin{aligned}
\sum g_x &= \sum \frac{\partial R}{\partial r}, \\
\sum g_y &= \frac{\cos u \sin i}{r \cos \varphi} \sum \frac{\partial R}{\partial \varphi} + \frac{\cos i}{r \cos^2 \varphi} \sum \frac{\partial R}{\partial \lambda}, \\
\sum g_z &= \frac{\cos i}{r \cos \varphi} \sum \frac{\partial R}{\partial \varphi} - \frac{\cos u \sin i}{r \cos^2 \varphi} \sum \frac{\partial R}{\partial \lambda}.
\end{aligned} \tag{3.3}$$

### 3.1.2 Невозмущенное движение

Из дифференциальных уравнений движения спутника следует, что при отсутствии возмущений ( $\sum g_x = \sum g_y = \sum g_z = 0$ ) элементы орбиты  $p$ ,  $e$ ,  $\Omega$  и  $i$  остаются постоянными, а  $\vartheta$  и  $u$  меняются следующим образом [77, 94, 95]:

$$\frac{d\vartheta}{dt} = \frac{du}{dt} = \frac{\sqrt{\mu p}}{r^2} \tag{3.4}$$

Это позволяет для расчета параметров невозмущенного (номинального) движения проводить интегрирование только двух уравнений, причем ввиду их одинаковой структуры решение ещё более упрощается.

### 3.1.3 Влияние нецентральности гравитационного поля Земли

Потенциал притяжения Земли во внешней точке с географическими координатами  $r$ ,  $\varphi$ ,  $\lambda$  в виде разложения по сферическим функциям, рекомендованном Международным астрономическим союзом [1, 77, 94, 95]:

$$U = \frac{\mu}{r} \left[ 1 - \sum_{n=2}^{\infty} c_{n0} \left( \frac{R_3}{r} \right)^n P_n(\sin \varphi) + \sum_{n=2}^{\infty} \sum_{m=1}^n \left( \frac{R_3}{r} \right)^n P_{nm}(\sin \varphi) (c_{nm} \cos m\lambda + d_{nm} \sin m\lambda) \right] \tag{3.5}$$

Здесь  $R_3 = 6378,14$  км – средний экваториальный радиус Земли,  $c_{n0}$ ,  $c_{nm}$ ,  $d_{nm}$  – безразмерные коэффициенты, зависящие от формы и распределения масс внутри Земли,  $P_n(\sin \varphi)$  – полиномы Лежандра порядка  $n$ ;  $P_{nm}(\sin \varphi)$  – присоединенные функции Лежандра порядка  $n$  и индекса  $m$ ;  $\varphi$ ,  $\lambda$  – геоцентрическая широта и гринвичская долгота соответственно.

Возмущающая функция  $\Delta U$  определяется как разность между принятой моделью потенциалов силы тяжести Земли  $U$  и силы тяжести шарообразной Земли

со сферическим распределением плотности  $\Delta U = U - \frac{\mu}{r}$ . Тогда частные производные возмущающей части потенциала притяжения Земли  $\Delta U$  имеют следующий вид [1, 77, 94, 95]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Delta U}{\partial r} &= \sum_{n=2}^{\infty} c_{n0} \frac{\mu R_{\oplus}^n (n+1)}{r^{n+2}} P_n(\sin \varphi) + \sum_{n=2}^{\infty} \sum_{m=1}^n - \frac{\mu R_{\oplus}^n (n+1)}{r^{n+2}} P_{nm}(\sin \varphi) (c_{nm} \cos m\lambda + d_{nm} \sin m\lambda), \\ \frac{\partial \Delta U}{\partial \varphi} &= - \sum_{n=2}^{\infty} c_{n0} \frac{\mu R_{\oplus}^n \cos \varphi}{r^{n+1}} \frac{\partial P_n(\sin \varphi)}{\partial \sin \varphi} + \sum_{n=2}^{\infty} \sum_{m=1}^n \frac{\mu R_{\oplus}^n \cos \varphi}{r^{n+1}} \frac{\partial P_{nm}(\sin \varphi)}{\partial \sin \varphi} (c_{nm} \cos m\lambda + d_{nm} \sin m\lambda), \quad (3.6) \\ \frac{\partial \Delta U}{\partial \lambda} &= \sum_{n=2}^{\infty} \sum_{m=1}^n \frac{\mu R_{\oplus}^n m}{r^{n+1}} P_{nm}(\sin \varphi) (-c_{nm} \sin m\lambda + d_{nm} \cos m\lambda). \end{aligned}$$

Из соотношений

$$\begin{aligned} \alpha &= \Omega + \arctg(\operatorname{tg} u \cos i), \quad (\alpha - \Omega) \text{ лежит в одной четверти с } u \\ \delta &= \arcsin(\sin u \sin i) \\ \alpha &= S + \lambda \\ \delta &= \varphi \end{aligned} \quad (3.7)$$

находятся географические координаты  $\varphi$  и  $\lambda$  (соответственно широта и долгота):

$$\begin{aligned} \varphi &= \arcsin(\sin u \sin i) \\ \lambda &= \Omega - S + \arctg(\operatorname{tg} u \cos i), \\ (\lambda - \Omega + S) &\text{ лежит в одной четверти с } u \end{aligned} \quad (3.8)$$

$S$  находится по формуле Ньюкома для эпохи 12 часов 1 января 2000 г. [77, 94, 95]:

$$\begin{aligned} S_0 &= 101,25228375^\circ + 36000,77005361^\circ t + 3,8793333333 \cdot 10^{-4} t^2 \\ S &= S_0 + M(1 + 0.002737903) \end{aligned} \quad (3.9)$$

Значения коэффициентов  $c_{nm}$ ,  $d_{nm}$  первых гармоник до шестого порядка включительно представлены в таблице 3.1 [1, 77, 94, 95]:

Таблица 3.1 – Значения коэффициентов  $c_{nm}$ ,  $d_{nm}$  первых гармоник

до шестого порядка

$$c_{10} = c_{11} = d_{11} = 0$$

$n$	$M$	$c_{nm}$	$d_{nm}$	$n$	$m$	$c_{nm}$	$d_{nm}$
2	0	$1,0826 \cdot 10^{-3}$	-	5	1	$-4,5958 \cdot 10^{-8}$	$-6,8485 \cdot 10^{-8}$
2	2	$1,5362 \cdot 10^{-6}$	$-8,8149 \cdot 10^{-7}$	5	2	$9,6889 \cdot 10^{-8}$	$6,4588 \cdot 10^{-8}$
3	0	$-2,5410 \cdot 10^{-6}$	-	5	3	$-1,9302 \cdot 10^{-8}$	$-5,3972 \cdot 10^{-9}$
3	1	$2,1578 \cdot 10^{-6}$	$2,4127 \cdot 10^{-7}$	5	4	$-9,0188 \cdot 10^{-10}$	$-3,5344 \cdot 10^{-10}$
3	2	$2,6584 \cdot 10^{-7}$	$-2,5795 \cdot 10^{-7}$	5	5	$3,4363 \cdot 10^{-10}$	$-2,1382 \cdot 10^{-9}$
3	3	$6,8343 \cdot 10^{-8}$	$2,1311 \cdot 10^{-7}$	6	0	$5,5201 \cdot 10^{-7}$	-
4	0	$-1,6180 \cdot 10^{-6}$	-	6	1	$-5,6780 \cdot 10^{-8}$	$1,3970 \cdot 10^{-8}$
4	1	$-4,9093 \cdot 10^{-7}$	$-4,5670 \cdot 10^{-7}$	6	2	$3,0690 \cdot 10^{-9}$	$-5,0575 \cdot 10^{-7}$
4	2	$7,6688 \cdot 10^{-8}$	$1,5021 \cdot 10^{-7}$	6	3	$9,1517 \cdot 10^{-11}$	$6,0242 \cdot 10^{-10}$
4	3	$6,2092 \cdot 10^{-8}$	$-7,1254 \cdot 10^{-9}$	6	4	$-3,7866 \cdot 10^{-10}$	$-1,1469 \cdot 10^{-9}$
4	4	$-2,2211 \cdot 10^{-9}$	$7,5348 \cdot 10^{-9}$	6	5	$-1,0899 \cdot 10^{-10}$	$-4,9202 \cdot 10^{-10}$
5	0	$-2,2800 \cdot 10^{-7}$	-	6	6	$-6,7881 \cdot 10^{-12}$	$-6,1337 \cdot 10^{-11}$

Полиномы Лежандра порядка  $n$  и их производные по  $x$  [1]:

$$P_n(x) = \sum_{k=0}^{E\left(\frac{n}{2}\right)} (-1)^k \frac{(2n-2k)!}{2^n k!(n-k)!(n-2k)!} (x)^{n-2k} \quad (3.10)$$

где  $E(x)$  – целая часть числа  $x$ ,

$$\frac{\partial P_n(x)}{\partial x} = \sum_{k=0}^{E\left(\frac{n-1}{2}\right)} (-1)^k \frac{(2n-2k)!}{2^n k!(n-k)!(n-2k-1)!} (x)^{n-2k-1} \quad (3.11)$$

Присоединенные функции Лежандра порядка  $n$  индекса  $m$  и их производные по  $x$  [1]:

$$P_{nm}(x) = (1-x^2)^{\frac{m}{2}} \sum_{k=0}^{E\left(\frac{n-m}{2}\right)} (-1)^k \frac{(2n-2k)!}{2^n k!(n-m-2k)!(n-k)!} (x)^{n-m-2k} \quad (3.12)$$

$$\frac{\partial P_{nm}(x)}{\partial x} = \frac{mx}{x^2-1} P_{nm}(x) + (1-x^2)^{\frac{m}{2}} \sum_{k=0}^{E\left(\frac{n-m-1}{2}\right)} (-1)^k \frac{(2n-2k)!}{2^n k!(n-m-2k-1)!(n-k)!} (x)^{n-m-2k-1}$$

### 3.1.4 Возмущения гравитационной природы от Луны и Солнца

В рамках данной работы, из-за значительной удаленности Луны и Солнца, их можно рассматривать как материальные точки, осуществляющие гравитационное

воздействие на космический аппарат. Это позволяет достаточно просто описать возмущающую функцию, а именно [77, 94, 95]:

$$R_j = \frac{\mu_j}{r_j} \sum_{n=2}^{\infty} \left( \frac{r}{r_j} \right)^n P_n(\cos \theta_j), \quad (3.13)$$

где  $\cos \theta_j = \sin \delta \sin \delta_j + \cos \delta \cos \delta_j \cos(\alpha - \alpha_j)$ ,  $\mu_j$  - произведение гравитационной постоянной на массу  $j$ -го возмущающего тела,  $r_j$  - расстояние от центра Земли до возмущающего тела,  $\delta$ ,  $\alpha$  и  $\delta_j$ ,  $\alpha_j$  - склонение и прямое восхождение спутника и возмущающего тела.

В разложении возмущающей функции по полиномам Лежандра для Луны ограничимся двумя первыми членами, а для Солнца – одним, так как в первом случае  $\frac{r}{r_j} \approx 0,11$ , а во втором -  $\frac{r}{r_j} \approx 0,28 \cdot 10^{-3}$  соответственно.

Производные от пертурбационной функции  $R_j(x, y, z, t)$  по координатным осям  $X_R$ ,  $Y_T$ ,  $Z_N$  вычисляются по формулам [77, 94, 95]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial R_j}{\partial r} &= \frac{\mu_j}{r_j} \sum_{n=2}^m \frac{nr^{n+1}}{r_j^n} P_n(\cos \theta_j), \\ \frac{\partial R_j}{\partial \varphi} &= \frac{\mu_j}{r_j} \sum_{n=2}^m \left( \frac{r}{r_j} \right)^n \frac{\partial P_n(\cos \theta_j)}{\partial \cos \theta_j} \frac{\partial \cos \theta_j}{\partial \varphi}, \\ \frac{\partial R_j}{\partial \lambda} &= \frac{\mu_j}{r_j} \sum_{n=2}^m \left( \frac{r}{r_j} \right)^n \frac{\partial P_n(\cos \theta_j)}{\partial \cos \theta_j} \frac{\partial \cos \theta_j}{\partial \lambda}. \end{aligned} \quad (3.14)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \cos \theta_j}{\partial \varphi} &= \cos \delta \sin \delta_j - \sin \delta \cos \delta_j \cos(\alpha - \alpha_j), \\ \frac{\partial \cos \theta_j}{\partial \lambda} &= -\cos \delta \cos \delta_j \sin(\alpha - \alpha_j). \end{aligned}$$

Один из возможных методов определения координат Луны и Солнца будет приведен ниже.

### 3.1.5 Учет давления солнечного света

Эффект, связанный с влиянием давления солнечного света заметен на орбитах с постоянной наблюдаемостью Солнца, а также тех где существенно

уменьшено влияние атмосферных возмущений возмущения. Для упрощения модели используется предположение о том, что коэффициент отражения и площадь отражающей поверхности космического аппарата это постоянные величины. Если принять во внимание, что расстояние от Земли до космического аппарата существенно меньше расстояния от Земли до Солнца ( $r_3$ ), то возмущения вызванные этим явлением можно записать как [77, 94, 95]:

$$R = -K_c S_c q_c \frac{\tilde{r}_3^2 r}{r_3^2} \cos \theta \quad (3.15)$$

где  $K_c$  – коэффициент отражения космического аппарата;  $S_c$  – отношение проекции площади отражающей поверхности на нормаль к направлению светового потока, к массе спутника;  $q_c$  – световое давление в районе орбиты Земли;  $\tilde{r}_3$  – средний радиус орбиты Земли.

Проекция возмущающего ускорения от светового давления на оси  $X_R, Y_T, Z_N$  [Д39]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial R}{\partial r} &= -K_c S_c q_c \frac{\tilde{r}_3^2}{\tilde{r}_3^2} \cos \theta, \\ \frac{\partial R}{\partial \varphi} &= -K_c S_c q_c \frac{\tilde{r}_3^2 r}{\tilde{r}_3^2} \frac{\partial \cos \theta}{\partial \varphi}, \\ \frac{\partial R}{\partial \lambda} &= -K_c S_c q_c \frac{\tilde{r}_3^2 r}{\tilde{r}_3^2} \frac{\partial \cos \theta}{\partial \lambda}, \end{aligned} \quad (3.16)$$

где  $\frac{\partial \cos \theta}{\partial \varphi}$  и  $\frac{\partial \cos \theta}{\partial \lambda}$  определены ранее.

Условием применения данного возмущения является нахождение КА вне цилиндра, радиуса равного радиусу Земли и осью, совпадающей с направлением Земля→Солнце. Тогда условие освещенности КА:  $\cos \varphi = A \cos \vartheta + B \sin \vartheta \geq 0$  или  $\Phi_T < 0$ , а «уравнение тени» [77, 94, 95]:

$$\Phi_T = a_3^2 (1 + e \cos \vartheta)^2 + p^2 (A \cos \vartheta + B \sin \vartheta)^2 - p^2 \quad (3.17)$$

$$\text{где } A = \frac{X_c p_x + Y_c p_y + Z_c p_z}{(X_c^2 + Y_c^2 + Z_c^2)^{1/2}}; \quad B = \frac{X_c q_x + Y_c q_y + Z_c q_z}{(X_c^2 + Y_c^2 + Z_c^2)^{1/2}}.$$

Выражения для А и В можно преобразовать [77, 94, 95]:

$$\begin{aligned}
X_c &= r_c \cos \lambda_c \\
Y_c &= r_c \sin \lambda_c \cos \varepsilon \\
Z_c &= r_c \sin \lambda_c \sin \varepsilon \\
r_c &= (X_c^2 + Y_c^2 + Z_c^2)^{1/2} \\
\Rightarrow A &= p_x \cos \lambda_c + p_y \sin \lambda_c \cos \varepsilon + p_z \sin \lambda_c \sin \varepsilon; \\
B &= q_x \cos \lambda_c + q_y \sin \lambda_c \cos \varepsilon + q_z \sin \lambda_c \sin \varepsilon \\
p_x &= \cos \omega \cos \Omega - \sin \omega \sin \Omega \cos i; \\
p_y &= \cos \omega \sin \Omega + \sin \omega \cos \Omega \cos i; \\
p_z &= \sin \omega \sin i; \\
q_x &= -\sin \omega \cos \Omega - \cos \omega \sin \Omega \cos i; \\
q_y &= -\sin \omega \sin \Omega + \cos \omega \cos \Omega \cos i; \\
q_z &= \cos \omega \sin i
\end{aligned} \tag{3.18}$$

### 3.1.6 Вычисление ускорений от торможения атмосферой

Учет аэродинамических сил необходим при прогнозировании движения КА по орбитам с высотами (или перигеем) до 800-1000 км. При всем многообразии способов учета торможения атмосферой в рамках данной работы будем рассматривать только возмущение от силы сопротивления набегающему потоку, которая направлена в противоположно вектору скорости КА. Соответствующие проекции возмущающего ускорения вычисляются по формулам [62, 104, 105]:

$$\begin{aligned}
\Delta g_{1,x} &= -A(\dot{X} + \omega_0 Y) \\
\Delta g_{1,y} &= -A(\dot{Y} + \omega_0 X) \\
\Delta g_{1,z} &= -A\dot{Z}
\end{aligned} \tag{3.19}$$

где  $A = C_b \rho V$ ,  $V = \sqrt{\dot{X}^2 + \dot{Y}^2 + \dot{Z}^2}$ ,  $C_b = \frac{C_d S}{2m}$  – баллистический коэффициент КА;  $\rho$  –

плотность атмосферы;  $\omega_0$  – угловая скорость вращения атмосферы, принимаемая равной угловой скорости вращения планеты;  $m$  – масса КА;  $S$  – характерная площадь КА;  $C_d$  – коэффициент силы аэродинамического сопротивления КА.

Величина коэффициента  $C_d$  зависит главным образом от двух факторов: средней длины пробега молекул воздуха в атмосфере и размеров КА. В силу того,

что величина значение  $C_d$  может быть рассчитана заранее, то величина площади космического аппарата, взятая в качестве базовой для расчета аэродинамического сопротивления, будет зависеть, в том числе, и от пространственной ориентации спутника, иными словами является переменной. Поэтому, при отсутствии в модели движения уравнений характеризующих движение вокруг центра масс, в формуле (3.19) используется осредненное произведение  $C_d S$ , значение которого можно уточнять по результатам уточнения оценок параметров орбиты реального космического аппарата.

Наиболее сложной и важной проблемой при построении комплекса моделирования в части расчета аэродинамической силы является выбор модели зависимости плотности атмосферы от высоты полета  $\rho(h)$ , наиболее распространенные из которых это ВСА-82 ГОСТ 25654.115-84 и ДСА-84.

Значение плотности ВСА-82, выраженное в  $кг/м^3$ , вычисляют по формуле

$$\rho(h) = A \exp \left[ -k_1(h - h_j) + k_2(h - h_j)^2 \right] \quad (3.20)$$

где  $h$  – высота;  $h_j$  – верхняя граница слоя, определяющая значения коэффициентов, входящих в правую часть формулы плотности (Таблица 3.2):

Таблица 3.2 – Определение коэффициентов ВСА-82

$h, км$	$h_j, км$	$A, кг/км^3$	$k_1 \cdot 10^2, 1/км$	$k_2 \cdot 10^5, 1/км^2$
0..19	0	$1.225 \cdot 10^9$	7.825	-263.9
20..59	20	$0.891 \cdot 10^8$	16.37	44.07
60..99	60	$2.578 \cdot 10^5$	5.905	-256
100..149	100	$4.061 \cdot 10^2$	17.87	146.9
150..299	150	2.13	3.734	8.004
300..599	300	$4.764 \cdot 10^{-2}$	0.7735	0.7111
600..899	600	$8.726 \cdot 10^{-3}$	0.928	0.1831
$\geq 900$	900	$6.367 \cdot 10^{-4}$	0.954	0

Согласно модели динамической стандартной атмосферы ДСА–84 плотность вычисляется по формуле

а) для высот в диапазоне 0..120 км :  $\rho(h) = A \exp \left[ -k_1(h - h_j) + k_2(h - h_j)^2 \right]$ , где коэффициенты берутся из таблицы 3.3:

Таблица 3.3 – Определение коэффициентов ДСА-84

$h, \text{ км}$	$h_j, \text{ км}$	$A, \text{ кг/км}^3$	$k_1 \cdot 10^2, \text{ 1/км}$	$k_2 \cdot 10^5, \text{ 1/км}^2$
0..19	0	$1.225 \cdot 10^9$	7.825	-263.9
20..59	20	$0.891 \cdot 10^8$	16.37	44.07
60..99	60	$2.578 \cdot 10^5$	5.905	-256
100..149	100	$4.061 \cdot 10^2$	17.87	146.9

б) для высот в диапазоне 120..1500 км  $\rho(h) = \rho_n k_0 k_1 k_2 k_3 k_4$ , где  $\rho_n = 9.80665 \exp[A_1 - A_2 \sqrt{h - A_3}]$  – плотность «ночной» атмосферы;  $k_0$  – коэффициент, учитывающий вариации плотности, вызванные средневзвешенным значением коэффициента солнечной активности;  $k_1$  – коэффициент, учитывающий суточный эффект перераспределения плотности;  $k_2$  – коэффициент, учитывающий полугодовой эффект перераспределения плотности;  $k_3$  – коэффициент, учитывающий вариации плотности, определяемые отклонением коэффициента солнечной активности от средневзвешенного значения;  $k_4$  – коэффициент, учитывающий зависимость плотности атмосферы от геомагнитной активности. Эти коэффициенты вычисляются по следующим формулам:

$$\begin{aligned}
 k_0 &= 1 + (L_0 + L_1 h + L_2 h^2) (\bar{F}_{10.7} - F_{10.7}), \\
 k_1 &= 1 + (C_0 + C_1 h + C_2 h^2 + C_3 h^3) \left[ \frac{1 + C_\varphi}{2} \right]^{0.5(n_0 + n_1 h)}; \\
 k_2 &= 1 + A(D) (D_0 + D_1 h + D_2 h^2 + D_3 h^3), \\
 k_3 &= 1 - (B_0 + B_1 h + B_2 h^2) \frac{\bar{F}_{10.7} - F_{10.7}}{F_{10.7}}; \\
 k_4 &= 1 + (E_0 + E_1 h + E_2 h^2 + E_3 h^3) (E_4 + E_5 K_p + E_6 K_p^2), \\
 C_\varphi &= \frac{1}{R} [Z \sin \delta_c + \cos \delta_c (X \cos \beta + Y \sin \beta)], \\
 \beta &= \alpha_c - S - \omega_0 (T_D - \delta T) + \varphi_1
 \end{aligned} \tag{3.21}$$

где  $T_D$  – местное время в секундах;  $S$  – звездное время на текущей долготе;  $\delta T$  – сдвиг местного (поясного) времени по отношению GMT;  $D$  – число суток с начала года до местной даты расчета;  $\alpha_c$ ,  $\delta_c$  – прямое восхождение и склонение Солнца;  $\bar{F}_{10.7}$  –

осредненный нормированный коэффициент солнечной активности на волне 10.7 см;  $K_p$  – коэффициент геомагнитной активности.

Коэффициенты  $A_j$ ,  $D_j$ ,  $B_j$ ,  $C_j$ ,  $n_j$ ,  $\varphi_l$ ,  $E_j$ ,  $L_j$  и значения функции  $A(D)$  задаются таблично [62, 72, 104].

### 3.1.7 Расчет координат Луны и Солнца

Эклиптические координаты Солнца рассчитываются по формулам [77, 94, 95]:

$$\begin{aligned}\lambda_c &= \omega_c + \vartheta_c, \\ \beta_c &= 0, \\ r_c &= \frac{a_c(1 - e_c^2)}{1 + e_c \cos \vartheta_c},\end{aligned}\tag{3.22}$$

где

$$\begin{aligned}\omega_c &= L - D - l' \\ e_c &= 0,01675104 - 0,0000418 t \\ \vartheta_c &= M_c + 2e_c \sin M_c + 5e_c^2 \sin 2M_c \\ M_c &= l' \\ a_c &= 149,5 \cdot 10^6 \text{ км}\end{aligned}$$

$L$ ,  $D$ ,  $l'$  – фундаментальные астрономические аргументы, вычисляемые по известным формулам [77, 94, 95]:

$$\begin{aligned}L &= 0,7512060108 + 1336,85523095 t - 0,00314815 \cdot 10^{-3} t^2 \\ D &= 0,9742707948 + 1236,8530950463 t - 0,00398919 \cdot 10^{-3} t^2 \\ l' &= 0,9957662037 + 99,9973604167 t - 0,00041667 \cdot 10^{-3} t^2\end{aligned}\tag{3.23}$$

где  $t$  – время, отсчитываемое в юлианских столетиях от эпохи 1900 года.

Несложно перевести координаты Солнца в ГрЭСК:

$$\begin{aligned}X_c &= r_c \cos \lambda_c \\ Y_c &= r_c \sin \lambda_c \cos \varepsilon \\ Z_c &= r_c \sin \lambda_c \sin \varepsilon\end{aligned}$$

Угол наклона эклиптики:

$$\varepsilon = 23^\circ 27' 8,2849'' + 46,8093'' t + 0,0059'' t^2 - 0,00183'' t^3$$

В [77, 94, 95] предложено рассчитывать координаты Луны в уравнениях (3.13) с использованием её усредненных координат [77, 94, 95].

Вращение линии узлов и линии апсид:

$$\begin{aligned}\Omega_{\text{Л}} &= 259^{\circ}10'59,79'' - 1934^{\circ}08'31,23''t + 7,48''t^2 + 0,008''t^3 \\ \omega_{\text{Л}} &= 75^{\circ}08'46,61'' + 6003^{\circ}10'33,75''t - 44,65''t^2 - 0,053''t^3\end{aligned}\quad (3.24)$$

где  $t$  – время, отсчитываемое в юлианских столетиях от 1900 года.

Для расчета прямоугольных координат Луны в ГрЭСК находятся полярные координаты в эклиптической СК [77, 94, 95]:

$$\begin{aligned}E - e \sin E = M : \quad E_{k+1} &= M + e \sin E_k, \quad E_0 = M, \\ M &= \frac{2\pi}{T}(t - \tau);\end{aligned}\quad (3.25)$$

$$\tan \frac{\mathcal{G}}{2} = \sqrt{\frac{1+e}{1-e}} \tan \frac{E}{2}$$

$$\sin \beta_{\text{Л}} = \sin i_{\text{Л}} \sin(\omega_{\text{Л}} + \mathcal{G}_{\text{Л}})$$

$$\tan(\lambda_{\text{Л}} - \Omega_{\text{Л}}) = \cos i_{\text{Л}} \tan(\omega_{\text{Л}} + \mathcal{G}_{\text{Л}})$$

$$r_{\text{Л}} = \frac{a_{\text{Л}}(1 - e_{\text{Л}}^2)}{1 + e_{\text{Л}} \cos \mathcal{G}_{\text{Л}}}$$

$(\lambda_{\text{Л}} - \Omega_{\text{Л}})$  и  $(\omega_{\text{Л}} + \mathcal{G}_{\text{Л}})$  находятся в одном квадранте.

Координаты Луны в ГрЭСК:

$$\begin{aligned}X_{\text{Л}} &= r_{\text{Л}} \cos \beta_{\text{Л}} \cos \lambda_{\text{Л}} \\ Y_{\text{Л}} &= r_{\text{Л}} (\cos \beta_{\text{Л}} \sin \lambda_{\text{Л}} \cos \varepsilon - \sin \beta_{\text{Л}} \sin \varepsilon) \\ Z_{\text{Л}} &= r_{\text{Л}} (\cos \beta_{\text{Л}} \sin \lambda_{\text{Л}} \sin \varepsilon + \sin \beta_{\text{Л}} \cos \varepsilon)\end{aligned}\quad (3.26)$$

Параметры движения Луны:

$$\frac{2\pi}{T_{\text{Л}}} = n_{\text{Л}} = 2,661699489 \cdot 10^{-6} \text{ рад} / \text{с}$$

$$a_{\text{Л}} = 384400 \text{ км}$$

$$e_{\text{Л}} = 0,0549005$$

$$i_{\text{Л}} = 5^{\circ}08'43,5''$$

### 3.1.8 Модель вектора тяги

Номинальную ориентацию вектора тяги  $P$  в пространстве удобно задать в связанной орбитальной системе координат  $ORTN$  углами  $\beta$  и  $\gamma$  как показано на рисунке 3.1.

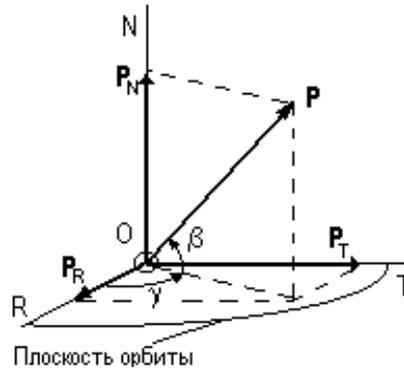


Рисунок 3.1 – Ориентация вектора тяги

Проекции вектора тяги на оси системы ORTN имеют вид:

$P_R = P \cos \beta \cos \gamma$ ,  $P_T = P \cos \beta \sin \gamma$ ,  $P_N = P \sin \beta$ , где  $P$  – тяга корректирующего двигателя.

С целью получения наиболее полной модели вектора тяги двигателя, положим, что на каждом активном участке применяется собственная номинальная ориентация вектора тяги, т.е.  $\beta = \beta_k$ ,  $\gamma = \gamma_k$ . Представляя каждый из углов суммой номинального угла и малой его вариации, получим

$$\begin{aligned} P_R &= P (\cos \beta_k \cos \gamma_k - \delta\beta_k \sin \beta_k \cos \gamma_k - \delta\gamma_k \cos \beta_k \sin \gamma_k) \\ P_T &= P (\cos \beta_k \sin \gamma_k - \delta\beta_k \sin \beta_k \sin \gamma_k - \delta\gamma_k \cos \beta_k \cos \gamma_k) \\ P_N &= P (\sin \beta_k + \delta\beta_k \cos \beta_k) \end{aligned} \quad (3.27)$$

где  $\beta_k$ ,  $\gamma_k$  – номинальные углы,  $\delta\beta_k$ ,  $\delta\gamma_k$  – ошибки ориентации вектора тяги.

Соотношения (3.27) можно представить в векторно-матричной форме

$$\mathbf{P} = P(\mathbf{P}_k + \mathbf{M}_k \mathbf{v}_k) \quad (3.28)$$

где  $\mathbf{P}^T = (P_R \ P_T \ P_N)$  – вектор тяги на  $k$ -м активном участке в орбитальной системе координат;

$$\mathbf{P}_k = \begin{pmatrix} \cos \beta_k \cos \gamma_k \\ \cos \beta_k \sin \gamma_k \\ \sin \beta_k \end{pmatrix}, \quad \mathbf{M}_k = \begin{pmatrix} -\sin \beta_k \cos \gamma_k & -\cos \beta_k \sin \gamma_k \\ -\sin \beta_k \sin \gamma_k & -\cos \beta_k \cos \gamma_k \\ \cos \beta_k & 0 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{v}_k = \begin{pmatrix} \delta\beta_k \\ \delta\gamma_k \end{pmatrix} \quad (3.29)$$

Заметим, что  $P_k$  есть номинальный единичный вектор тяги (орт ориентации), а вектор  $\mathbf{v}_k$  – его вариация.

С другой стороны, тяга двигателя  $P_k$ , равна произведению удельного импульса на расход массы топлива (рабочего тела). Учитывая возможные разбросы расхода и удельного импульса, модель тяги представим в виде [94, 95, 97]

$$P = (c_k + \delta c_k)(J_k + \delta J_k) \cong P_k + \delta P_k \quad (3.30)$$

где  $\delta P_k = J_k \delta c_k + c_k \delta J_k$  – ошибка тяги;  $c_k$  – номинальный расход массы рабочего тела;  $J_k$  – номинальный удельный импульс;  $P_k = c_k J_k$  – номинальная тяга.

Если предположить, что на активном участке коррекции масса КА изменяется незначительно, но отличается от расчетной на величину  $\delta m_k$ . При этом тяга постоянна с точностью до ошибки  $\delta P_k$ . Тогда ускорение от тяги можно рассчитать по формуле

$$f_{pk} = \frac{P_k}{m_k} = \frac{P_k + \delta P_k}{m_k + \delta m_k}.$$

Линеаризуя это выражение разложением в ряд Тейлора в окрестности номинальных тяги и массы с точностью до линейных членов, получим

$$f_{pk} = f_k \left( 1 + \frac{\delta m_k}{m_k} + \frac{\delta P_k}{P_k} \right) = f_k (1 + \mu_k) \quad (3.31)$$

где  $f_k = \frac{P_k}{m_k}$  – номинальное ускорение;  $\mu_k = \frac{\delta m_k}{m_k} + \frac{\delta P_k}{P_k}$  – мультипликативная случайная ошибка тяги.

Если в формулах (3.1)-(3.3) ускорению от тяги двигателя поставить индекс  $j=1$ , то модель вектора  $\Delta \mathbf{G}_{1k}$  ускорения от тяги на  $k$ -м активном участке следующая из (3.28) и (3.31) примет вид:

$$\Delta \mathbf{G}_{1k} = \begin{pmatrix} \Delta g_{1R} \\ \Delta g_{1T} \\ \Delta g_{1N} \end{pmatrix}_k = f_k (1 + \mu_k) (\mathbf{P}_k + \mathbf{M}_k \mathbf{v}_k) \quad (3.32)$$

Пренебрегая в (3.32) членом, содержащим произведение ошибок, приведем его к векторной форме:

$$\Delta \mathbf{G}_{1k} = \mathbf{F}_k (1 + \mu_k) + \boldsymbol{\eta}_k \quad (3.33)$$

где  $\mathbf{F}_k = f_k \mathbf{P}_k$  – номинальный вектор ускорения при ориентации  $\mathbf{P}_k$ ;  $\boldsymbol{\eta}_k = f_k \mathbf{M}_k \mathbf{v}_k$  – случайный вектор аддитивных ошибок вектора  $\mathbf{F}_k$ .

Если все случайные величины, входящие в определения случайных факторов в (3.33) являются гауссовскими центрированными, то статистические характеристики мультипликативного и аддитивного возмущений можно вычислить по формулам

$$M[\mu_k] = 0, \quad \sigma_{\mu k} = \sqrt{\frac{\sigma_{mk}^2}{m_k^2} + \frac{\sigma_{Pk}^2}{P_k^2}} \quad (3.34)$$

$$M[\eta_k] = 0, \quad D_\eta = M[\eta_k \eta_k^T] = f_k^2 \mathbf{M}_k \mathbf{D}_{vk} \mathbf{M}_k^T,$$

где  $\mathbf{D}_{vk}$  – корреляционная матрица вектора ошибок ориентации  $\mathbf{v}_k$ .

На КА ОГ ДЗЗ могут устанавливаться двигатели как малой, так и большой тяги. В первом случае, при интегрировании системы дифференциальных уравнений длительность активного участка можно считать нулевой и выполнять импульсное изменение фазового вектора в момент, соответствующий моменту включения двигательной установки. В случае с двигателем малой тяги, когда длительности активных участков велики и кратны периоду обращения, необходимо это учитывать, за счет введения в систему дифференциальных уравнений режима «вкл./выкл.», создавая в момент включения возмущение от постоянной тяги, ориентация которой в общем случае может изменяться в соответствии с имеющейся программой или законом управления.

При использовании двигателя большой тяги, длительностью активного участка можно пренебречь. При использовании двигателя малой тяги, длительности активных участков могут быть соизмеримы с периодом обращения спутника по орбите. В рамках перечисленных вариантов двигатели работают в режиме «включен»/«выключен», создавая на активном участке постоянную тягу. При этом для достижения заданной терминальной точности может потребоваться несколько активных участков.

### 3.2 Модель проведения орбитальных коррекций КА ДЗЗ

Можно выделить следующие типы коррекций орбит КА ОГ ДЗЗ: коррекции направленные на компенсацию ошибок выведения, удержание параметров орбиты в требуемом диапазоне и маневры изменения высоты (для эллиптических орбит – высоты перигея). Если рассматривать модель КА как составную часть существующей системы ДЗЗ, то можно ограничиться рассмотрением последних двух моделей, так как первая производится однократно, сразу после выведения. Анализ КА ДЗЗ, проведенный в п. 1.2.1, выявил следующие типовые орбиты КА ОГ ДЗЗ:

- низкие, близкие к круговым, с высотой 400~1000 км;
- круговые;
- эллиптические.

В качестве методов поддержания параметров структуры ОГ можно выделить:

- активные, предполагающие наличие бортовой ДУ коррекции;
- пассивные, предполагающие формирование начальных параметров орбит исходя из будущей их эволюции (далее – упреждения);
- комбинации активных и пассивных методов.

Основными возмущениями типовых орбит КА ОГ ДЗЗ являются: долгопериодические возмущения гринвичской долготы восходящего узла трасс, вековые возмущения эксцентриситета, аргумента перигея, наклона и абсолютной долготы восходящего узла.

Коррекции эксцентриситета необходимы, если из-за увеличения высоты апогея будут ухудшаться результаты проведения съемки объектов. Как следует из результатов моделирования, характер эволюции эксцентриситета зависит от начальной даты и инерциальной долготы восходящего узла орбитальной плоскости. Эксцентриситет может монотонно убывать, монотонно возрастать или даже оставаться практически постоянным. Поэтому активное удержание эксцентриситета целесообразно планировать для орбит с монотонным его возрастанием в сочетании с пассивным упреждением. Пассивное упреждение эксцентриситета заключается в выведении КА на орбиту с эксцентриситетом

меньше номинального и проведение активной коррекции, когда он достигнет предельно допустимого значения, выбранного исходя из максимально допустимой дистанции связи.

Коррекции аргумента перигея необходимы в случае ухудшения условий наблюдения из-за отклонения оси трасс от условной вертикали. Определяющим фактором является эксцентриситет номинальной орбиты группировки. Так, для высоких круговых орбит из-за вырожденности аргумента перигея необходимость проведения коррекций эксцентриситета и аргумента широты перигея (АШП) практически отсутствует. Для орбит с эксцентриситетом 0,15. И выше целесообразно применять технологию, аналогичную удержанию эксцентриситета. Иными словами, аргумент широты перигея начальной орбиты формируется по методу упреждения с определением границ допустимого интервала с учетом градиента АШП. Коррекция проводится при выходе текущего значения на левую (или правую) границу интервала с целью возврата на противоположную.

Импульс скорости коррекции периода обращения или эксцентриситета прикладывается в апогее или в перигее витка.

Коррекция эксцентриситета включает два маневра с целью сохранения драконического периода обращения при постоянстве аргумента перигея.

Импульс скорости при коррекции аргумента перигея прикладывается в точках орбиты с истинной аномалией  $\pm 90^0$ . Коррекция включает два маневра с целью сохранения драконического периода обращения при постоянстве эксцентриситета.

Существенное влияние на целевую эффективность ОГ оказывает эволюция долгот восходящих узлов трасс. Поэтому удержание гринвичской долготы трассы в заданных пределах относительно номинального значения следует считать обязательной компонентой стратегии поддержания. Для поддержания (или иначе – удержания) гринвичской долготы восходящего узла можно применять только активный метод.

В работе [109, 110] показано, что основой при формировании коррекции типовых орбит КА ОГ ДЗЗ является необходимость обеспечения установившегося

положения высоты и трассы полета космических аппаратов [109, 110]. Эта задача в основном сводится к удержанию гринвичских долгот восходящих узлов орбит  $\lambda_3$  в заданном ограниченном диапазоне  $\Delta\lambda_3$ , который определяет возможные колебания трасс полета.

Действительно, для КА, находящихся на низких орбитах, могут быть заданы допустимые погрешности большой полуоси  $\Delta a$  и долготы восходящего узла  $\Delta\lambda$ , которые определяются из условия сохранения орбитой солнечной синхронности. Если КА находится на максимальной с точки зрения сохранения солнечной синхронности высоте, то ее последующее снижение за счёт атмосферного торможения сопровождается смещением трассы на запад, а затем после снижения трассы до номинальной высоты на восток (рисунок 3.2). Поэтому, после дрейфа большой полуоси и восходящего узла в точку А, необходимо выполнить изменение высоты орбиты, и, после отработки активного участка, космический аппарат переместится в фазовое состояние В. В результате образуется цикл, параметры которого могут быть рассчитаны заранее.

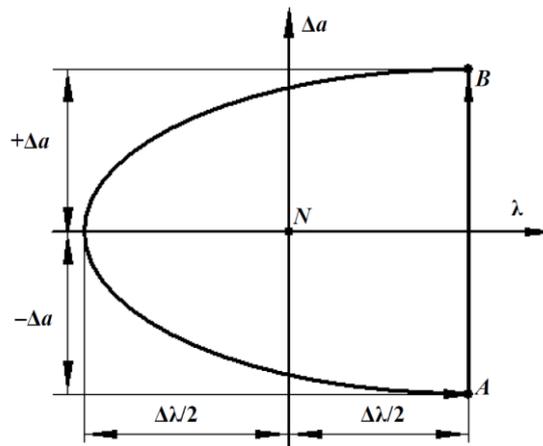


Рисунок 3.2 – Фазовая траектория для процесса удержания трассы и высоты полета КА на низкой околокруговой орбите

Рассмотрим возмущения, которые изменяют драконический период обращения космического аппарата. К ним в первую очередь относятся составляющие гравитационных возмущений, представленных в (3.5) с индексами (2,2,1,1).

Особенностью эволюции параметров [98] геостационарных и высокоэллиптических орбит КА также является наличие долгопериодических колебаний гринвичской долготы восходящего узла  $\lambda_3$  относительно некоторых точек устойчивости  $\lambda_{ст}^{opt}$  [110, 111] (долгот устойчивого равновесия). Для высокоэллиптических орбит минимум этих колебаний достигается в окрестности  $68^\circ$  в.д. и  $112^\circ$  з.д., а для геостационарных  $-75,3^\circ$  в.д.,  $104,7^\circ$  з.д.,  $165,3^\circ$  в.д., и  $14,7^\circ$  з.д. Спутники, находящиеся на орбитах с периодом обращения, равным звездным суткам или их половине, и гринвичскими долготами восходящих узлов, совпадающими с указанными устойчивыми долготами, будут в течение длительного времени сохранять высокую стабильность трасс.

Если долгота восходящего узла  $\lambda_3$  орбиты в номинальном положении не совпадает с долготой устойчивого равновесия, то при этом сохраняется условие пребывания трассы в диапазоне  $\lambda_3 \pm \Delta\lambda$ . При выведении спутников долгота восходящего узла орбиты приводится в требуемый диапазон по долготе и драконический период обращения доводится до значения, отвечающего стабильной трассе. В зависимости от ошибок доведения периода обращения и под влиянием аномалий гравитационного поля Земли долгота восходящего узла будет смещаться в западном или восточном направлении. Характер возможного движения определяется из анализа фазовых траекторий движения спутника. Для каждого диапазона ( $\lambda_3 - \Delta\lambda$ ,  $\lambda_3 + \Delta\lambda$ ) может быть проведено множество фазовых траекторий, отличающихся значением долготы при значении драконического периода обращения, равном стабильному. Такие фазовые траектории приведены на рисунке 3.3 для двух вариантов расположения рассматриваемого диапазона относительно долготы устойчивого равновесия.

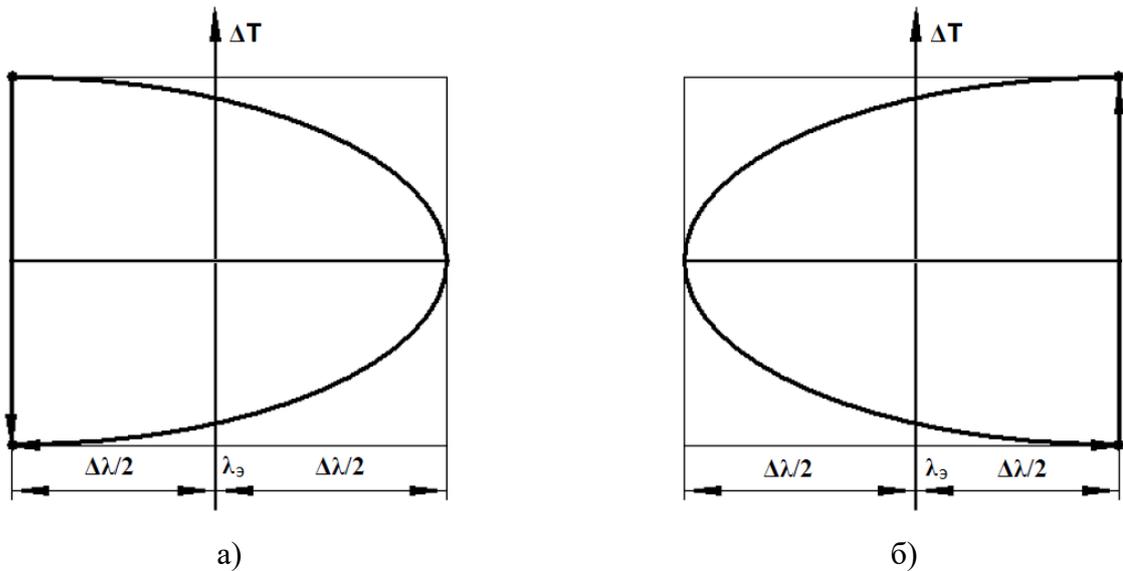


Рисунок 3.3 – Фазовая траектория для процесса удержания долготы восходящего узла: а)  $\lambda_3 > \lambda_{ст}^{opt}$  б)  $\lambda_3 < \lambda_{ст}^{opt}$

Следовательно, в идеальном случае обеспечение стабильности трассы в требуемом диапазоне долгот восходящих узлов сводится к изменению драконического периода обращения на одной из границ диапазона: левой при  $\lambda_3 > \lambda_{ст}^{opt}$  и правой при  $\lambda_3 < \lambda_{ст}^{opt}$ . Значение периода обращения при этом необходимо выбирать таковым, чтобы обеспечить попадание на самую внешнюю фазовую траекторию. Самым внешним траекториям соответствует наибольшее время движения, а значит, наименьшее число коррекций за время существования КА. В зависимости от ширины и положения диапазона долгот удержания трасс полета относительно точек устойчивости поддержание динамической устойчивости можно обеспечить как выбором начальных значений  $T_\Omega$  и  $\lambda_3$  таким образом, чтобы трасса полета в течение заданного времени не выходила за пределы допустимого диапазона, так и путем коррекции периода обращения. В результате проведенного анализа получается, что для обеспечения изомаршрутности типовых трасс КА ОГ ДЗЗ необходима коррекция двух параметров – высоты перигея орбиты и драконического периода обращения.

Для решения такой можно воспользоваться как классическими детерминированными методами, так и рассмотреть решение задачи в стохастической постановке. Независимо от постановки, решение должно

предоставить нам возможные оценить моменты и длительность проведения коррекций (на основе запаса характеристической скорости) и, тем самым сформировать временные интервалы для запрета проведения съемки.

При формировании методики решения задачи введем предположение о возможном раздельном изменении параметров плоскости орбиты (эксцентриситет, период обращения, большая полуось, долгота восходящего узла и т.п.) и ее пространственной ориентации (наклонения). Коррекция наклонения является весьма энергозатратной операцией, поэтому будем считать, что процесс управления это совокупность коррекций параметров плоскости орбиты на фоне коррекции ее наклонения. Так как затраты топлива на корректирование наклонения обуславливаются лишь величиной прогнозируемого его ухода [98], а оптимальным (в смысле минимума энергозатрат) является проведение коррекций в окрестностях узлов, программа этих коррекций считается заранее известной, а затраты характеристической скорости можно рассчитать по формуле :

$$V_x(i) = V_{кр} \sin\left(\frac{\Delta i}{2}\right)$$

### **3.2.1 Обеспечение изменения трассы путем проведения орбитальных коррекций**

Если исходить из того, что на спутник действует возмущение, обусловленное гармониками с индексами (2,0) и (2,2) разложения геопотенциала, то для определения интервала времени между коррекциями и величины изменения драконического периода обращения при коррекции достаточно проинтегрировать систему (3.1) для рассматриваемых параметров орбит при начальных значениях периода обращения, соответствующего стабильному, и значению долготы восходящего узла. При этом периодичность коррекций определяется удвоенным временем движения спутника до левой или правой границы, а величина изменения периода обращения в процессе коррекции  $\Delta T_K$  – удвоенным значением периода обращения на одной из границ диапазона. Значение периода обращения при этом необходимо выбирать таковым, чтобы обеспечить наибольшее время движения до

момента коррекции, а значит, наименьшее число коррекций за время существования КА.

### *Методика изменения высоты перигея*

Задача об изменении высоты перигея формулируется следующим образом. Задана исходная орбита. Полагается, что она определяется апогейным и перигейным расстояниями в первом приближении соответственно  $r_{п1}, r_{а1}$ . Требуется определить величину, направление и точку приложения управляющего импульса скорости, обеспечивающего изменение перигейного расстояния с  $r_{п1} = r_{п1}$  на  $r_{п2}$  при условии сохранения апогейного расстояния орбиты, т.е. при условии  $r_{а1} = r_{а2}$ . Здесь и далее индекс (1) соответствует исходной орбите, а (2) – требуемой орбите. Учитывая связь элементов орбиты формирования пары перигей-апогей формирует пару пары фокальный параметр-относительный эксцентриситет и наоборот [77, 95]:

$$\left. \begin{aligned} e &= \frac{r_a - r_p}{r_a + r_p}, \\ p &= a(1 - e^2) = \frac{r_a + r_p}{2} \left[ 1 - \left( \frac{r_a - r_p}{r_a + r_p} \right)^2 \right] = \frac{2r_a r_p}{r_a + r_p} \end{aligned} \right\} \quad (3.35)$$

Поэтому, условия, налагаемые на маневр, можно записать в виде:

$$\left. \begin{aligned} e_2 &= \frac{r_{a1} - (r_{п1} + \Delta r_p)}{r_{a1} + (r_{п1} + \Delta r_p)} \\ p_2 &= \frac{2r_{a1}(r_{п1} + \Delta r_p)}{r_{a1} + (r_{п1} + \Delta r_p)} \end{aligned} \right\} \quad (3.36)$$

Обратимся теперь к функции импульса [110]:

$$\frac{\Delta V}{V_{кр}} = \sqrt{\left( \sqrt{\frac{p_2}{r_1}} - \sqrt{\frac{p_1}{r_1}} \right)^2 + \left( \frac{e_2 \sin v_2}{\sqrt{\frac{p_2}{r_1}}} - \frac{e_1 \sin v_1}{\sqrt{\frac{p_1}{r_1}}} \right)^2} \quad (3.37)$$

В выражении этой функции входят известные величины  $p_1, p_2, e_1, e_2$  и неизвестные величины  $v_1, v_2, r_1$ . Однако из трех пока что неизвестных величин две являются независимыми.

Радиус орбиты в точке приложения импульса при заданных элементах орбиты  $p_1, e_1$  являются функцией истинной аномалии этой точки:

$$r_0 = r_1(v_1) = \frac{p_1}{1 + e_1 \cos v_1}.$$

Кроме того, имеется еще одна связь, вытекающая из свойства импульсного управления, а именно, что точка приложения импульса принадлежит одновременно исходной и новой орбитам. Математически это условие имеет следующий вид:

$$r_2(v_2) = r_1(v_1)$$

или

$$\frac{p_2}{1 + e_2 \cos v_2} = \frac{p_1}{1 + e_1 \cos v_1}. \quad (3.38)$$

В этом уравнении в данном конкретном случае определяется истинная аномалия  $v_2$  в функции истинной аномалии  $v_1$ .

Таким образом, функция импульса в задаче изменения высоты перигея при неизменной высоте апогея является функцией одного переменного, определяющего точку приложения импульса, т.е.  $\Delta V = \Delta V(v_1)$ .

Аналитическое выражение этой функции не представляет труда получить из (3.37). С учетом указанных зависимостей  $r_1(v_1)$  и  $v_2(v_1)$  имеем [77, 95]

$$\Delta V = \sqrt{K \frac{(\sqrt{p_2} - \sqrt{p_1})^2}{p_1^2} (1 + e_1 \cos v_1)^2 + K \left( \frac{\sqrt{e_2^2 - \left[ \frac{p_2}{p_1} (1 + e_1 \cos v_1 - 1) \right]^2}}{\sqrt{p_2}} - \frac{e_1 \sin v_1}{\sqrt{p_1}} \right)^2} \quad (3.39)$$

$$K = \frac{V_{a1}^2}{2 r_{a1}},$$

Изначально в задаче истинная аномалия точки импульсной коррекции не определена и должна быть вычислена. Определение ее положения является составной частью при расчете маневра наряду с расчетом приращения характеристической скорости для выполнения маневра. Решением задачи будет такая точка на орбите, характеризуемая истинной аномалией  $v_1$ , в которой функция (3.39) при приложении импульса тяги имеет минимальное значение.

Для отыскания оптимального решения достаточно исследовать функцию (3.39) на экстремум. Возьмем частную производную подкоренного выражения по переменной  $v_1$  и приравняем ее к нулю:

$$\begin{aligned}
& 2K \frac{(\sqrt{p_2} - \sqrt{p_1})^2}{p_1^2} (1 + e_1 \cos v_1) e_1 \sin v_1 + 2K \left( \frac{\sqrt{e_2^2 - \left[ \frac{p_2}{p_1} (1 + e_1 \cos v_1 - 1) \right]^2}}{\sqrt{p_2}} - \frac{e_1 \sin v_1}{\sqrt{p_1}} \right) \times \\
& \times \left( \frac{\frac{p_2 e_1 \sin v_1}{p_1}}{2\sqrt{p_2} \sqrt{e_2^2 - \left[ \frac{p_2}{p_1} (1 + e_1 \cos v_1 - 1) \right]^2}} - \frac{e_1 \cos v_1}{\sqrt{p_1}} \right) = 0.
\end{aligned} \tag{3.40}$$

Непосредственной проверкой убеждаемся, что корнями уравнения (3.40) являются  $v_1 = 0$  и  $v_1 = \pi$ . При этом первое слагаемое и первый множитель второго слагаемого равны нулю. Однако решение  $v_1 = 0$  противоречит основному свойству импульсного маневра, поскольку точка приложения импульса принадлежит одновременно исходной и новой орбитам и принадлежит перигею, который требуется изменить. Поэтому исследуем второе решение, когда  $v_1 = \pi$ .

В [110] показано, что множитель

$$\left( \frac{\sqrt{e_2^2 - \left[ \frac{p_2}{p_1} (1 + e_1 \cos v_1 - 1) \right]^2}}{\sqrt{p_2}} - \frac{e_1 \sin v_1}{\sqrt{p_1}} \right)$$

при условии  $v_1 = \pi$  обращается в нуль. Для этого достаточно, чтобы в нуль обратился числитель:  $\sqrt{e_2^2 - \left[ \frac{p_2}{p_1} (1 + e_1 \cos v_1 - 1) \right]^2}$ .

Имеем [77, 110]

$$e_2^2 - \left[ \frac{p_2}{p_1} (1 - e_1) - 1 \right]^2 = e_2^2 - \frac{p_2^2}{p_1^2} (1 - e_1)^2 + 2 \frac{p_2}{p_1} (1 - e_1) - 1 = e_2^2 - \frac{p_2^2}{r_{a1}^2} + 2 \frac{p_2}{r_{a1}} - 1.$$

Но  $r_{a1} = r_{a2}$ , а  $\frac{p_2}{r_{a1}} = l - e_2$ . В итоге получаем, что исследуемое выражение при  $v_1 = \pi$  обращается в нуль. Последнее показывает, что импульс для изменения высоты перигея должен быть приложен в апогее текущей орбиты. А так как точка приложения импульса принадлежит одновременно исходной и новой орбитам, то приходим к заключению о том, что истинная аномалия точки приложения импульса на новой орбите равно  $\pi$  и, следовательно, второе слагаемое в подкоренном выражении функции импульса равно нулю.

Таким образом, оптимальный маневр при изменении высоты перигея характеризуется приложением управляющего импульса в апогее исходной орбиты, и этот импульс является трансверсальным, т.е.

$$\Delta V_{min} = V_{кр} \left( \sqrt{\frac{p_2}{r_1}} - \sqrt{\frac{p_1}{r_1}} \right) = \frac{\sqrt{K}}{r_{a1}} (\sqrt{p_2} - \sqrt{p_1}) \quad (3.41)$$

Подставляю в формулу (3.41) выражение для  $p_2$ , содержащее заданное изменение перигея  $\Delta r_{п}$ , получим формулу, устанавливающую непосредственную зависимость между искомой величиной приращения скорости  $\Delta V_{min}$  и изменением высоты перигея  $\Delta r_{п}$ . Эта формула имеет вид [110]

$$\Delta V_{min} = \sqrt{2 \frac{K}{r_{a1}}} \left( \sqrt{\frac{r_{п1} + \Delta r_{п}}{r_{a1} + r_{п1} + \Delta r_{п}}} - \sqrt{\frac{r_{п1}}{r_{a1} + r_{п1}}} \right). \quad (3.42)$$

Заметим, что  $\sqrt{2 \frac{K}{r_{a1}}}$  есть скорость в апогее орбиты.

Управляющий импульс является трансверсальным, а его знак определяется непосредственно по формуле (3.42). Если  $\Delta r_{п} > 0$  (перигей повышается), то  $\Delta V_{min} > 0$ , а при понижении перигея  $\Delta r_{п} < 0$  дается тормозной импульс  $\Delta V_{min} < 0$ . Остается определить область существования решения.

Нижняя граница перигея обусловлена требованием, чтобы КА не проходил плотных слоев атмосферы, т.е.  $r_{п2}$  должен быть не менее  $r_{пдоп}$ . Что касается верхней границы перигея  $r_{пmax}$ , то она вытекает из физических соображений. При повышении перигея орбита все более стремится к круговой и при  $r_{a2} = r_{a1}$  она становится круговой. Если продолжать увеличивать импульс скорости  $\Delta V$ , то будет изменяться апогей орбиты, что противоречит условию задачи.

Таким образом, с помощью одноимпульсного маневра перигей орбиты можно поднять максимум до высоты апогея, т.е.

$$r_{пmax} \leq r_{a1}.$$

### ***Методика изменения периода обращения***

Период обращения  $T$  зависит только от величины большой полуоси орбиты и связан с ней формулой [77, 95]

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{a^3}{K}}.$$

Отсюда заключаем, что изменения периода обращения исходной орбиты  $T_1$  на величину  $\Delta T$  достаточно произвести такой маневр, при котором большая полуось изменилась бы на величину  $\Delta a$ . Имеем

$$T_1 + \Delta T = 2\pi \sqrt{\frac{(a_1 + \Delta a)^3}{K}},$$

откуда получаем искомую зависимость

$$\Delta T = 2\pi \sqrt{\frac{(a_1 + \Delta a)^3}{K}} - T_1.$$

Изменение периода достигается за счет изменения большой полуоси орбиты, поэтому для расчета маневра необходимо знать обратную зависимость, т.е.  $\Delta a = \Delta a(\Delta T)$ . Получить ее можно из формулы для приращения периода [110], для чего проделаем следующие элементарные операции:

$$\begin{aligned} \frac{(T_1 + \Delta T)^2}{(2\pi)^2} &= \frac{(a_1 + \Delta a)^3}{K}, \\ a_1 + \Delta a &= \sqrt[3]{\frac{K(T_1 + \Delta T)^2}{(2\pi)^2}} = \sqrt[3]{\frac{KT_1^2}{(2\pi)^2} \left(1 + \frac{\Delta T}{T_1}\right)^2}. \end{aligned}$$

Учитывая, что

$$\frac{KT_1^2}{(2\pi)^2} = a_1^3.$$

Тогда расчетная формула в относительных величинах принимает весьма простой вид [77, 95, 110]:

$$\frac{\Delta a}{a_1} = \left(1 + \frac{\Delta T}{T_1}\right)^{\frac{2}{3}} - 1.$$

При этом уравнения связей представляются в следующем виде:

$$\begin{aligned} \Delta a &= a_1 \left[ \left(1 + \frac{\Delta T}{T_1}\right)^{\frac{2}{3}} - 1 \right], \\ \frac{p_2}{1 + e_2 \cos v_2} &= \frac{p_1}{1 + e_1 \cos v_1}. \end{aligned}$$

Поскольку функция импульса содержит четыре неопределенных параметра  $(p_2, e_2, v_1, v_2)$ , то, следовательно, в задаче об изменениях периода обращения она будет функцией двух переменных.

Если принять, что в качестве переменных используются фокальный параметр и истинная аномалия в момент приложения импульса, то эксцентриситет орбиты можно представить в виде функции величин  $p_2, a_2$ :

$$e_2 = \sqrt{1 - \frac{p_2}{a_2}}.$$

Выражение для функции импульса  $\Delta V(p_2, v_1)$  оказывается весьма громоздким и неудобным для анализа. Поэтому для упрощения расчетов примем в качестве варьируемых параметров истинную аномалию  $v_1$  и угол  $\alpha_1$  между вектором  $\Delta \vec{V}$  и трансверсалью. Эти параметры оказывают непосредственное влияние на величину скорости, с которой большая полуось связана простой зависимостью [77, 95, 110]

$$V_2^2 = \frac{2K}{r_1} - \frac{K}{a_2} \quad \text{или} \quad \frac{K}{a_2} = \frac{2K}{r_1} - V_2^2. \quad (3.43)$$

Рассмотрим функциональную зависимость  $\frac{K}{a_2} = f(v_1, \alpha_1)$ , для чего запишем выражения для компонентов вектора скорости  $V_{2\tau}, V_{2r}$ . До приложения импульса в точке с истинной аномалией  $v_1$  имеем:

$$V_{1\tau} = \sqrt{\frac{K}{p_1}}(1 + e_1 \cos v_1), \quad V_{1r} = \sqrt{\frac{K}{p_1}}e_1 \sin v_1 \quad (3.44)$$

После приложения импульса в той же точке орбиты будем иметь

$$\left. \begin{aligned} V_{2\tau} &= \sqrt{\frac{K}{p_1}}(1 + e_1 \cos v_1) + \Delta V \cos \alpha_1 \\ V_{2r} &= \sqrt{\frac{K}{p_1}}e_1 \sin v_1 + \Delta V \sin \alpha_1 \end{aligned} \right\} \quad (3.45)$$

Подставляя компоненты скорости (3.44–3.45) в формулу (3.43), получим [77, 95]

$$\begin{aligned} \frac{K}{a_2} &= \frac{2K}{r_1} \left[ \sqrt{\frac{K}{p_1}}(1 + e_1 \cos v_1) + \Delta V \cos \alpha_1 \right]^2 - \left[ \sqrt{\frac{K}{p_1}}e_1 \sin v_1 + \Delta V \sin \alpha_1 \right]^2 = \\ &= \frac{2K}{p_1}(1 + e_1 \cos v_1) - \frac{K}{p_1}(1 + e_1 \cos v_1)^2 + 2 \sqrt{\frac{K}{p_1}}(1 + e_1 \cos v_1)\Delta V \cos \alpha_1 + \\ &\quad + \Delta V^2 \cos^2 \alpha_1 - \frac{K}{p_1}e_1^2 \sin^2 v_1 + 2 \sqrt{\frac{K}{p_1}}e_1 \sin v_1 \Delta V \sin \alpha_1 - \Delta V^2 \sin^2 \alpha_1 = \\ &= \frac{2K}{p_1} + \frac{2K}{p_1}e_1 \cos v_1 - \frac{K}{p_1} - 2 \frac{K}{p_1} \cos v_1 - \frac{K}{p_1}e_1^2 \cos^2 v_1 - \frac{K}{p_1}e_1^2 \sin^2 v_1 - \end{aligned}$$

$$-\Delta V^2 - 2 \sqrt{\frac{K}{p_1}} [(1 + e_1 \cos v_1) \cos \alpha_1 + e_1 \sin v_1 \sin \alpha_1] \Delta V,$$

откуда после упрощений будем иметь

$$\frac{K}{a} = \frac{K}{a_1} - \Delta V^2 - 2 \sqrt{\frac{K}{p_1}} [(1 + e_1 \cos v_1) \cos \alpha_1 + e_1 \sin v_1 \sin \alpha_1] \Delta V \quad (3.46)$$

Зависимость (3.46) можно рассматривать как функцию импульса в неявном виде.

Для того, чтобы определить направление приложения импульса тяги необходимо решить задачу максимизации изменения механической энергии, которая непосредственно связана с большой полуосью орбиты. При фиксированном значении  $\Delta V$  можно получить различное значение большой полуоси  $a_2$  в зависимости от  $v_1$  и  $\alpha_1$ . Нас интересует такое сочетание параметров  $v_1$  и  $\alpha_1$ , при котором имеет место наибольшее значение большой полуоси.

Для отыскания энергетически оптимального маневра исследуем функцию  $\frac{K}{a}(v_1, \alpha_1)$  на экстремум. Экстремальные уравнения при этом имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \left(\frac{K}{a}\right)}{\partial v_1} &= -2 \sqrt{\frac{K}{p_1}} e_1 \Delta V (\cos v_1 \sin \alpha_1 - \sin v_1 \sin \alpha_1) = 0, \\ \frac{\partial \left(\frac{K}{a}\right)}{\partial \alpha_1} &= 2 \sqrt{\frac{K}{p_1}} \Delta V (e_1 \sin v_1 \cos \alpha_1 - (1 + e_1 \cos v_1) \sin \alpha_1) = 0, \end{aligned} \quad (3.47)$$

или после упрощения

$$\left. \begin{aligned} \sin(\alpha_1 - v_1) &= 0, \\ e_1 \sin(\alpha_1 - v_1) + \sin \alpha_1 &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (3.48)$$

Отсюда следует, что  $\sin \alpha_1 = 0$  и экстремальный управляющий импульс является трансверсальным. При этом угол  $\alpha_1$  либо равен нулю, либо равен  $\pi$ . Очевидно, что  $\alpha_1 = 0$  соответствует разгону (увеличению энергии),  $\alpha_1 = \pi$  - торможению (уменьшению энергии). Из экстремальных уравнений (3.47) тоже вытекает, что  $v_1$  либо равна нулю, либо  $\pi$ , т.е. решение получается альтернативным. Где должен быть приложен импульс в перигее ( $v_1 = 0$ ) или в апогее ( $v_1 = \pi$ ), на этот вопрос уравнения (3.48) ответа не дают.

Исследуем вторую вариацию функции  $\frac{K}{a}$ . Имеем:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial^2(\frac{K}{a})}{\partial v_1^2} &= \sqrt{\frac{K}{p_1}} e_1 \Delta V \cos(\alpha_1 - v_1) = A \\ \frac{\partial^2(\frac{K}{a})}{\partial v_1 \partial \alpha_1} &= -2 \sqrt{\frac{K}{p_1}} e_1 \Delta V \cos(\alpha_1 - v_1) = B \\ \frac{\partial^2(\frac{K}{a})}{\partial \alpha_1^2} &= 2 \sqrt{\frac{K}{p_1}} \Delta V [e_1 \cos(\alpha_1 - v_1) + \cos \alpha_1] = C \end{aligned} \right\} \quad (3.49)$$

Достаточным условием экстремума функции  $\frac{K}{a}$  является неравенство

$$AC - B^2 > 0.$$

Решение (максимум) будет при условии  $A < 0$ ,  $C < 0$ , а минимум имеет место при  $A > 0$ ,  $C > 0$ .

Необходимым условием максимума является трансверсальный импульс  $\alpha_1 = \pi$  (тормозной импульс на уменьшение большой полуоси). Кроме того, должны выполняться достаточные условия:

$$\begin{aligned} \cos(\alpha_1 - v_1) &< 0, \\ e_1 \cos(\alpha_1 - v_1) + \cos \alpha_1 &< 0. \end{aligned}$$

Они, как видим, выполняются при  $v_1 = 0$  и не выполняются при  $v_1 = \pi$ . Следовательно, оптимальной точкой приложения импульса при уменьшении большой полуоси является перигей.

Исследуем теперь функцию  $\frac{K}{a}$  на минимум, что соответствует возрастанию большой полуоси. Для этого случая  $\alpha_1 = 0$  и достаточные условия примут вид

$$\begin{aligned} \cos(-v_1) &> 0, \\ e_1 \cos(-v_1) + 1 &> 0. \end{aligned}$$

Отсюда заключаем, что достаточные условия выполняются при  $v_1 = 0$  и не выполняются при  $v_1 = \pi$ .

Таким образом, оптимальный маневр при изменении большой полуоси орбиты характеризуется трансверсальным импульсом, приложенным в перигее орбиты. Учитывая связь периода обращения орбиты КА и большой полуоси без нарушения общности можно использовать полученные результаты при расчета оптимального маневра изменения периода обращения.

### *Методика удержания эксцентриситета*

Пусть требуется удерживать эксцентриситет в диапазоне  $e \in [e_H, e_B]$ . Как показали результаты моделирования эволюция эксцентриситета практически одинакова у всех КА, размещенных в одной и той же плоскости. При этом, в зависимости от начальной инерциальной долготы восходящего узла он монотонно растет, монотонно убывает. Встречаются ситуации когда имеется весьма длительный участок его роста/убывания за которым следует участок убывания/роста. В некоторых случаях на всем САС он принадлежит заданному интервалу.

Допустим что начальный эксцентриситет орбит каждой плоскости соответствует нижней или верхней границе интервала его удержания в зависимости от характера будущей эволюции. Тогда используя файлы прогноза неуправляемого движения КА ОГ, находим момент (номер витка)  $N_2$  выхода на противоположную границу интервала удержания эксцентриситета в каждой орбитальной плоскости. При этом считается что этот момент один и тот же для всех КА рассматриваемой плоскости. Таким образом, цель коррекции – изменить текущий эксцентриситет на величину, равную по модулю  $\Delta e = e_B - e_H$ . Если на интервале САС эксцентриситет орбит некоторой плоскости принадлежит диапазону удержания, коррекция не требуется.

Для определения характеристической скорости используем соотношения влияния трансверсального импульса на эксцентриситет (3.54).

$$\Delta e = \begin{cases} -(1 - e_0) \left( \pm 2 \frac{\Delta V_e}{V_A} + \frac{\Delta V_e^2}{V_A^2} \right) & \text{если коррекция в апогее} \\ (1 + e_0) \left( \pm 2 \frac{\Delta V_e}{V_{II}} + \frac{\Delta V_e^2}{V_{II}^2} \right) & \text{если коррекция в перигее} \end{cases} \quad (3.50)$$

где  $\Delta V_e$  – характеристическая скорость коррекции эксцентриситета;

$V_A$  и  $V_{II}$  – скорость в апогее (перигее) в момент коррекции;

$e_0$  – эксцентриситет орбиты в момент коррекции.

Знак  $\pm$  соответствует увеличению или уменьшению эксцентриситета.

При расчете стратегии ограничимся определением абсолютной потребной характеристической скорости, пренебрегая знаками и членами второго порядка малости при условии проведения коррекции в апогее (формула 3.51).

$$\Delta V_e = 0.5 \frac{\Delta e V_A}{1 - e_0} \quad (3.51)$$

Число коррекций эксцентриситета (при  $N_2 > 0$ ) будет равно  $N_e = \frac{3625}{N_2}$ .

### **Методика удержание аргумента перигея**

Стратегия удержания аргумента перигея  $\omega$  в диапазоне  $\omega \in [\omega_H, \omega_B]$  в целом аналогична стратегии удержания эксцентриситета. Цель коррекции – изменить текущий аргумент перигея на величину, равную по модулю  $\Delta\omega = \omega_B - \omega_H$ . Если на интервале САС аргумент перигея орбит некоторой плоскости принадлежит диапазону удержания, коррекция не требуется. Для определения потребной характеристической скорости трансверсального импульса скорости, прикладываемого в точках орбиты с истинной аномалией  $0.5\pi$  или  $1.5\pi$  при постоянстве эксцентриситета воспользуемся зависимостями (3.52).

$$\Delta\omega = -\Delta\vartheta, \quad (3.52)$$

$$\Delta\vartheta = -\vartheta_0 + \arccos \frac{1}{e_0} \left[ \frac{\left( \sin \delta_0 + \frac{\Delta V_\omega}{V_0} \right)^2}{\sin^2 \delta_0} (1 + e_0 \cos \vartheta_0) - 1 \right]$$

где  $\delta_0$  – угол между радиус-вектором и вектором скорости КА;

$\vartheta_0$  – истинная аномалия в точке приложения импульса;

$e_0$  – эксцентриситет;

$V_0$  – скорость КА в точке приложения импульса;

$\Delta V_\omega$  – величина характеристической скорости трансверсального импульса коррекции аргумента широты.

Учитывая значения истинной аномалии в точках проведения коррекции, ориентацию импульса вдоль трансверсали, что соответствует  $\sin \delta_0 = 1$ , а так же

пренебрегая членами второго порядка малости, находим модуль потребной характеристической скорости по формуле (3.53).

$$\Delta V_{\omega} = 0.5e_0V_0 \sin \Delta \omega \quad (3.53)$$

Допустим, что начальный аргумент широты орбит каждой плоскости соответствует нижней или верхней границе интервала его удержания в зависимости от характера будущей эволюции. Тогда, используя файлы прогноза неуправляемого движения КА ОГ, находим момент (номер витка)  $N_3$  выхода на противоположную границу интервала удержания аргумента перигея в каждой орбитальной плоскости. При этом считается, что этот момент один и тот же для всех КА рассматриваемой плоскости. Если на интервале планирования аргумент широты орбит некоторой плоскости принадлежит диапазону удержания, коррекция не требуется. В противном случае (при  $N_3 > 0$ ), число коррекций аргумента широты будет равно  $N_{\omega} = \frac{3625}{N_3}$ .

### 3.2.2 Синтез алгоритма управления долготой восходящего узла

Данный подход к решению задачи управления подразумевает линеаризацию исходных возмущенных уравнений движения (3.1) в окрестности средней долготы. Это позволяет синтезировать алгоритм управления для проведения динамических операций в окрестности опорной орбиты. Главными возмущениями, изменяющими драконический период обращения КА по орбите, являются возмущения вследствие резонанса с долготными членами разложения гравитационного потенциала. В разложении геопотенциала доминирующими являются компоненты возмущений с индексами (2,2,1,1). Поэтому в уравнениях движения можно выделить уравнения, описывающие эволюцию средней долготы и периода обращения (скорости дрейфа). С учетом ошибок реализации управляющего ускорения при корректировании средней долготы и возмущений от коррекции наклона уравнения движения долготы восходящего узла и скорости дрейфа представимы в дискретном виде [90, 110]

$$\begin{aligned} y_{k+1} &= y_k + [\vartheta_k + (1 + \mu_k)u_k]\Delta t_k + b_s\Delta t_k^2 + b_r\Delta t_k + \xi_{y_k} \\ \vartheta_{k+1} &= \vartheta_k + (1 + \mu_k)u_k + 2b_s\Delta t_k + \xi_{\vartheta_k} ; k = \overline{1, N} \end{aligned} \quad (3.54)$$

где  $k$  – индекс, соответствующий моменту начала проведения коррекции;  $N$  – количество коррекций;  $y_k = \Delta\lambda_k$  – отклонение ГДВУ от требуемого значения (в градусах);  $\vartheta_k$  – скорость изменения  $y_k$  или скорость дрейфа ГДВУ (в градусах/звездные сутки);  $u_k$  – корректирующее воздействие или приращение скорости дрейфа, обусловленное работой КДУ (в градусах/звездные сутки);  $\mu_k$  – мультипликативная ошибка реализации корректирующего воздействия  $u_k$ ;  $\xi_{y_k}, \xi_{\vartheta_k}$  – случайные аддитивные возмущения;  $b_s, b_r$  – постоянные на интервале времени  $\Delta t_k$  коэффициенты, вычисляемые по формулам:

$$b_r = -\frac{2(\Delta g_{rr} + \Delta g_{msr})}{v_0} ; b_s = -\frac{3\pi}{v_0}(\Delta g_{rs} + \Delta g_{mss}), \quad (3.55)$$

где  $\Delta g_{rr}, \Delta g_{rs}$  – проекции гравитационного возмущающего ускорения;  $\Delta g_{msr}, \Delta g_{mss}$  – проекции осредненного на интервале  $\Delta t_k$  возмущающего ускорения от гравитационных полей Луны и Солнца.

Статистические характеристики случайных факторов  $\mu_k, \xi_{y_k}, \xi_{\vartheta_k}$  считаются известными:

$$M[\mu_k] = M[\xi_{y_k}] = M[\xi_{\vartheta_k}] = 0, \quad M[\xi_{y_k}^2] = \sigma_{y_k}^2, \quad M[\xi_{\vartheta_k}^2] = \sigma_{\vartheta_k}^2, \quad M[\xi_{y_k}\xi_{\vartheta_k}] = K_k; \quad M[\mu_k^2] = \sigma_k^2$$

Систему уравнений плоского движения (3.54) можно представить в обобщенном векторно-матричном виде:

$$x_{k+1} = A_k x_k + B_k [(1 + \mu_k)u_k] + D_k + \xi_k \quad (3.56)$$

где  $k$  – число шагов;  $x_k$  –  $n$ -мерный вектор состояния системы;  $u_k$  –  $m$ -мерный вектор управления;  $A_k$  – квадратная матрица размером  $n \times n$ ;  $B_k$  – прямоугольная матрица размером  $n \times m$ ;  $D_k$  – неслучайный вектор размером  $n$ ;  $\mu_k$  – мультипликативная ошибка управления;  $\xi_k$  – вектор ошибок прогноза вектора состояния  $x_{k+1}$ ;

$$\begin{aligned} x_k &= (y_k \vartheta_k)^T, \quad \xi_k = (\xi_{y_k} \xi_{\vartheta_k})^T, \quad A_k = \begin{pmatrix} 1 & \Delta t_k \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad B_k = \begin{pmatrix} \Delta t_k \\ 1 \end{pmatrix}, \\ D_k &= \Delta t_k \begin{pmatrix} b_r + b_s \Delta t_k \\ 2b_s \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (3.57)$$

Обычно в рамках задачи управления конечным состоянием накладывается ограничение вида [71]:

$$M[x_{N+1}^T \lambda x_{N+1}] \leq F^* \quad (3.58)$$

Неравенство (3.58) критерием того, что координаты  $x_{N+1}$  принадлежат некоторой заданной области в пространстве  $x$  с определенной степенью вероятности. В качестве характеристики конечной точности можно принять величину:

$$J = \min_{\{u_k\}} M[x_{N+1}^T \lambda x_{N+1}]. \quad (3.59)$$

Таким образом, задача синтеза состоит в определении такого алгоритма коррекций  $\{u_k(x_k), k = \overline{1, N}\}$ , который позволит перевести КА из произвольного начального положения  $x_0$  в конечное  $x_{N+1}$  при минимуме (3.59) и ограниченных запасах топлива.

Если по результатам измерений восстанавливается полный вектор состояния КА, то для отыскания оптимального управления к системе (3.56) можно применить достаточные условия оптимальности. Отметим, что полученная нами модель движения содержит два типа аддитивных возмущений — систематические неслучайные  $D_k$  и случайные  $\xi_k$ . Этим она отличается от традиционных моделей, содержащих только случайные аддитивные возмущения [71].

Для решение задачи синтеза алгоритма управления КА в окрестности опорной орбиты будем использовать стохастический и гарантирующий подходы.

### ***Стохастический подход***

Для этого воспользуемся достаточными условиями оптимальности, согласно которым оптимальное управление должно удовлетворять следующему рекуррентному соотношению [7, 71]:

$$R_k(x_k) = \min M[R_{k+1}(x_{k+1})/x_k, u_k] \quad (3.60)$$

Граничное условие запишется в виде:

$$R_{N+1}(x_{N+1}) = x_{N+1}^T \lambda x_{N+1} \quad (3.61)$$

Можно показать, что функция будущих потерь  $R_k(x_k)$ , удовлетворяющая (3.60) имеет вид:

$$R_k(x_k) = x_k^T \lambda x_k + G_k^T x_k + c_k \quad (3.62)$$

При этом оптимальное управление представляет линейную функцию:

$$u_k = -L_k x_k - d_k \quad (3.63)$$

где коэффициенты обратной связи  $L_k$  и смещение  $d_k$  вычисляются с помощью рекуррентных соотношений:

$$\begin{aligned} L_k &= \gamma_k^{-1} B_k^T \lambda_{k+1} A_k, \\ d_k &= \gamma_k^{-1} B_k^T (\lambda_{k+1} D_k + G_{k+1}), \\ \gamma_k &= (1 + \sigma_k^2) B_k^T \lambda_{k+1} B_k, \\ \lambda_k &= A_k^T \lambda_{k+1} A_k - L_k^T \gamma_k L_k, \\ G_k &= A_k^T \lambda_{k+1} D_k + A_k^T G_{k+1} - \gamma_k d_k L_k^T, \\ c_k &= c_{k+1} + sp[F_k^T \lambda_{k+1} F_k K_k] + D_k^T \lambda_{k+1} D_k - \gamma_k d_k^2 + 2G_{k+1}^T D_k \end{aligned} \quad (3.64)$$

с граничными условиями на правом конце:

$$\lambda_{N+1} = \lambda; \quad G_{N+1} = 0; \quad c_{N+1} = 0. \quad (3.65)$$

Анализ соотношений (3.64) и (3.65) показывает, что в общем случае коэффициенты обратной связи  $L_k$  зависят только от статистических характеристик мультипликативного возмущения. Наличие же систематических возмущений приводит к изменению только самой структуры оптимального управления, что выражается в появлении дополнительного коэффициента смещения  $d_k$ , учитывающего влияние на объект аддитивных систематических возмущений.

### ***Гарантирующий подход***

При синтезе гарантирующего управления системой возмущения трактуются как неопределенные, но ограниченные [7, 71]. Примем  $|\mu| \leq \mu_m$ , где  $\mu_m$  – максимальное значение мультипликативной ошибки управления и будем считать, что, как и в стохастическом случае, аддитивные неопределенные факторы влияют только на функцию будущих потерь и правые части изопериметрических ограничений. Иными словами, аддитивными неопределенными факторами будем пренебрегать.

В рамках гарантирующего подхода будем искать оптимальное управление  $\{u_k(x_k)\}$ , которое обеспечивает минимакс критерия (3.59) [7, 71]:

$$u_k = \arg \min_{u_k} \max_{\mu_k} (x_{N+1}^T \lambda x_{N+1}) \quad (3.66)$$

Воспользуемся условиями оптимальности, согласно которым функция будущих потерь должна удовлетворять соотношению [7, 71]:

$$R_k(x_k) = \min_{u_k} \max_{\mu_k} M[R_{k+1}(x_{k+1})/x_k, u_k] \quad (3.67)$$

с граничным условием

$$R_{N+1}(x_{N+1}) = x_{N+1}^T \lambda x_{N+1} \quad (3.68)$$

С учетом (3.56) и (3.59) условие минимакса (3.67) для  $k=N$  принимает вид:

$$R_N(x_N) = \min_{u_N} \max_{|\mu_N| < \mu_N} [f_{0N}^2 + u_N(1 + \mu_N^2)f_{1N} + 2u_N(1 + \mu_N)f_{2N}], \quad (3.69)$$

где

$$f_{0N} = x_N^T A_N^T \lambda_{N+1} A_N x_N + 2(D_N^T \lambda_{N+1} + G_{N+1}^T) A_N x_N + D_N^T \lambda_{N+1} D_N + 2G_{N+1}^T D_N + sp(F_N^T \lambda_{N+1} F_N K_N),$$

$$f_{1N} = B_N^T \lambda_{N+1} B_N,$$

$$f_{2N} = B_N^T \lambda_{N+1} A_N x_N + B_N^T \lambda_{N+1} D_N + G_{N+1}^T B_N.$$

Условие минимакса функции (3.69) имеет вид:

$$u_N^2 (\vartheta^B)^2 f_{1N} + 2u_N (\vartheta^B) f_{2N} = u_N^2 (\vartheta^H)^2 f_{1N} + 2u_N (\vartheta^H) f_{2N}, \quad (3.70)$$

где

$$\vartheta = 1 + \mu ; \vartheta^H = 1 - \mu_{\min} ; \vartheta^B = 1 + \mu_{\max}.$$

Из (3.70) находим:

$$u_N = -\frac{f_{2N}}{f_{1N}} = -(B_N^T \lambda_{N+1} A_N x_N + B_N^T \lambda_{N+1} D_N + G_{N+1}^T B_N) / (B_N^T \lambda_{N+1} B_N). \quad (3.71)$$

Нетрудно заметить, что выражение (3.71) с точностью до слагаемого  $\sigma_k^2$  в (3.64) совпадает с выражением (3.63), иными словами в случае гарантирующего подхода к решению задачи оптимального управления в системе (3.56) при  $k=N$  искомое управление инвариантно к возмущениям.

Функция будущих потерь при этом примет вид:

$$R_N(x_N) = \frac{f_{2N}}{f_{1N}} \mu_N^2 + f_{0N} - \frac{f_{2N}^2}{f_{1N}} = x_N^T \lambda_N x_N + G_N^T x_N + c_N, \quad (3.72)$$

где

$$\lambda_N = A_N^T \lambda A_N - L_N^T \gamma_N L_N, \quad (3.73)$$

$$\gamma_N = (1 - \mu_N^2) B_N^T \lambda B_N. \quad (3.74)$$

Последние соотношения показывают, что функция будущих потерь  $R_k(x_k)$  и закон управления  $u_k(x_k)$  имеют вид, аналогичный (3.62) – (3.64) с точностью до  $\gamma_k$ , вычисляемого по (3.74).

Автором предлагается использовать синтезированный закон управления (3.63) или (3.71) для оценки периодичности коррекций КА ДЗЗ, их длительности и диапазоне колебаний долготы восходящего узла в перерывах между коррекциями.

На этапе поддержания параметров орбитальной группировки КА ДЗЗ он находится в допустимой области пространства. В этом случае для стабилизации долготы восходящего узла необходимо не более одной коррекции в течение достаточно длительного интервала времени между коррекциями и КА постоянно находится в состоянии фиктивного равновесия относительно некоторой точки в пространстве фазовых координат  $(y, \vartheta)$  (рисунки 3.2, 3.3). Тогда величины коррекций вычисляются по формулам (3.62) – (3.65) при  $N=1$ . При этом интервалы между коррекциями  $\Delta t$  должны выбираться из условия:

$$|y_k(\Delta t_k)| \leq \Delta \lambda_{max}, \quad (3.75)$$

где  $\Delta \lambda_{max}$  – заданная величина, характеризующая требуемый интервал удержания по долготе.

При  $N=1$ , с учетом соотношений (3.62) – (3.65) достаточно легко получить скалярные соотношения для вычисления коэффициентов обратной связи и смещения (3.64), принимая матрицу  $\lambda$  симметричной с известными элементами  $\lambda_{11}, \lambda_{12}, \lambda_{22}$  (индекс  $k$ , равный 1, для сокращения записи опускаем):

$$\begin{aligned}
L_y &= (\Delta t_k + \chi_2)(1 + \sigma_k^2)^{-1}(\Delta t_k^2 + 2\chi_2\Delta t_k + \chi_1)^{-1}, \\
L_\vartheta &= (1 + \sigma_k^2)^{-1}, \\
d &= [\Delta t_k^2(b_r + b_s\Delta t_k) + \chi_2\Delta t_k(3b_s\Delta t_k + b_r) + 2b_s\Delta t_k\chi_1](1 + \sigma_k^2)^{-1}(\Delta t_k^2 + 2\chi_2\Delta t_k \\
&\quad + \chi_1)^{-1}
\end{aligned} \tag{3.76}$$

где

$$\chi_2 = \frac{\lambda_{12}}{\lambda_{11}}\chi_1 = \frac{\lambda_{22}}{\lambda_{11}},$$

Тогда управление может быть вычислено по формуле:

$$u = -L_y y - L_\vartheta \vartheta - d \tag{3.77}$$

Формально получаем, что управление зависит от трех параметров:  $\Delta t_k$ ,  $\chi_1$ ,  $\chi_2$ , которые подлежат дальнейшему доопределению путем оценки их влияния на амплитуду колебаний долготы восходящего узла и скорости дрейфа. Если ввести предположение, что  $\lambda_{12} = 0$  и снять ограничение на конечную скорость дрейфа (формально положив  $\lambda_{22} = 0$ ), то (3.77) примет вид

$$u_k = -(1 + \sigma_k^2)^{-1} \left[ \frac{y_k}{\Delta t_k} + \vartheta_k + (b_r + b_s\Delta t_k) \right] \tag{3.78}$$

Для того, чтобы оценить параметры установившегося режима зафиксируем  $\Delta t_k$  и подставим (3.78) в (3.54), считая при этом, что  $N \geq 1$ . В результате получим:

$$x_{k+1} = \tilde{A}x_k + \tilde{C}, \tag{3.79}$$

где

$$\begin{aligned}
\tilde{A} &= \begin{bmatrix} 1 - L_y\Delta t_k(1 + \mu_k) & \Delta t_k[1 - L_\vartheta(1 + \mu_k)] \\ -L_y(1 + \mu_k) & 1 - L_\vartheta(1 + \mu_k) \end{bmatrix} \\
\tilde{C} &= \begin{bmatrix} b_r\Delta t_k + b_s\Delta t_k^2 - d\Delta t_k(1 + \mu_k) \\ 2b_s\Delta t_k - d(1 + \mu_k) \end{bmatrix} + \xi_k
\end{aligned} \tag{3.80}$$

С целью оценки амплитуды колебаний долготы восходящего узла и скорости дрейфа, рассмотрим предельные траектории, для которых:

$$\mu_k \in \{0, \mu_{max}, \mu_{min}\}; \xi \in \{0, \xi_{max}, \xi_{min}\}, \tag{3.81}$$

где случай  $\mu_k=0$  и  $\xi_k=0$  равносильно применению в (3.79) операции математического ожидания.

Поскольку в этом случае матрицы  $\tilde{A}$  и  $\tilde{C}$  являются матрицами с постоянными коэффициентами, то система (3.79) может быть представлена в виде:

$$x_k = \tilde{A}^{(k)} x_0 + \left( \sum_{j=0}^{k-1} \tilde{A}^{(j)} \right) \tilde{C}, \quad (3.82)$$

где  $\tilde{A}^{(k)}$  –  $k$ -разовое произведение матрицы,  $\tilde{A}^{(0)} = E$ .

Обозначим через  $x^*$  координаты КА в установившемся режиме. Тогда при  $\mu_k$  и  $\tilde{\zeta}_k$ , принимающих фиксированные предельные значения из набора (3.81) получим, что:

$$x_k^* = \lim_{n \rightarrow \infty} \left( \tilde{A}^{(k)} x_0 + \left( \sum_{j=0}^{k-1} \tilde{A}^{(j)} \right) \tilde{C} \right). \quad (3.83)$$

Условием существования установившегося режима в (3.82) является существование предела в (3.83). Это возможно, когда корни характеристического уравнения матрицы удовлетворяют условию:

$$|v_s| < 1, \quad s = 1, 2. \quad (3.84)$$

Раскрывая предел в (3.83), для  $x^*$  получим:

$$x^* = (E - \tilde{A})^{-1} \tilde{C} \quad (3.85)$$

Равенство (3.85) показывает, что вектор состояния КА в установившемся режиме зависит лишь от интервалов времени между коррекциями  $\Delta t_k$  и требуемой амплитуды колебаний долготы восходящего узла и скорости дрейфа, определяемой параметрами матрицы  $\lambda_{N+1}$  [69, 98].

Таким образом, при заданной периодичности коррекций и амплитуды колебаний долготы восходящего узла, используя непосредственную связь  $u_k$  с периодом обращения КА, полученные результаты позволяют оценить приращения характеристической скорости и, как следствие, время необходимое для проведения коррекций.

В заключении, используя непосредственную связь  $u_k$  с периодом обращения КА, можно перевести  $u_k$  в приращения характеристической скорости КА –  $\Delta V$  вдоль трансверсали:

$$\Delta V = 3\Delta T V_a \mu^{-1} \quad (3.86)$$

### 3.3 Общий подход к формированию моделей съемки и сеансов связи

Основными целевыми операциями КА ДЗЗ являются сбор информации при совершении съемки земных объектов с ее записью в БЗУ и передача информации

на ППИ. На рисунке 3.4 представлена геометрическая их интерпретация на одном витке, где в плоскости географических координат показаны относительное положение трассы КА, земных объектов, зон обслуживания бортовой съемочной аппаратуры КА, ППИ и их зон радиовидимости. Трассе КА поставлена в соответствие временная ось.

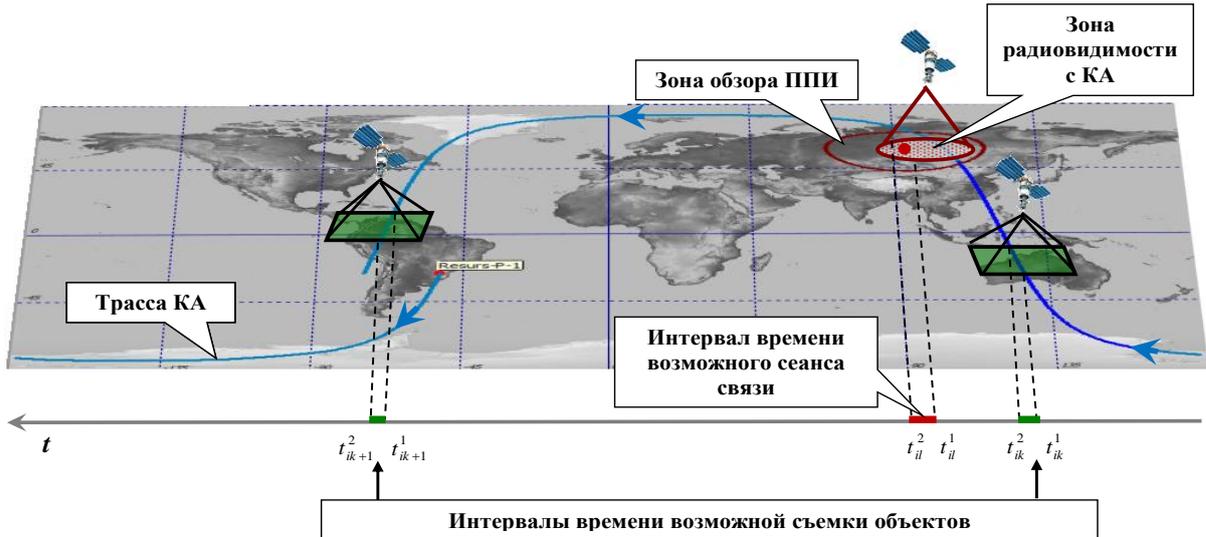


Рисунок 3.4 – Съемка объектов и передача данных в ППИ

При решении задачи планирования считается, что множество  $\Xi_T$  объектов, подлежащих съемке на интервале планирования, полностью сформировано и разбито на непересекающиеся подмножества объектов  $\Xi_j$ , требующих съемки одной и той же аппаратурой:

$$\Xi_T = \bigcup_j \Xi_j, \quad \Xi_i \cap \Xi_j = \emptyset \quad \forall i \neq j$$

Другими словами, любой объект из множества  $\Xi_j$  может быть снят целевой аппаратурой однотипных КА, каждому объекту в множестве  $\Xi_j$ , присвоен номер  $n$ ,  $n=1, \dots, N$ . Геометрическим образом наземного объекта является часть сферической поверхности Земли радиуса  $R_E$ , ограниченная замкнутым контуром. Контур, задающий границы объекта, может иметь произвольную форму.

### 3.3.1 Особенности применения математической модели движения

Особенностью решения задачи распределения целевой информации является проведение многократных вычислений, в основе которых лежит определение векторов-состояния КА ОГ ДЗЗ в различные моменты времени. В классической постановке это предполагает многократное интегрирование уравнений движения как для высокоточного прогнозирования (п. 3.2), так и оценки времени проведения коррекций орбиты и пространственной переориентации КА (п.3.3). Это приводит к неприемлемым затратам вычислительных ресурсов.

С другой стороны, в предложенном методическом подходе (п. 2.2.2) обоснована возможность выделения вопросов динамики управляемого движения КА в виде отдельного этапа вычислений. Вопрос стоит лишь в том, как это наилучшим образом организовать.

Модель движения КА ОГ ДЗЗ представляет собой модель высокоточного прогнозирования векторов состояния (п. 3.2) на фоне которого производятся периодические коррекции (п. 3.3) поддержания орбитальных параметров (рисунок 3.). При этом, после проведения коррекций требуется еще некоторое время для успокоения и уточнения эфемерид КА. В эти интервалы времени, которые будем называть плановым техническим обслуживанием, проведение съемки КА невозможно. С методической точки зрения, для решения распределительной задачи необходимо определять:

- моменты времени  $t_{iorb}^2$  и векторы-состояния начала неуправляемого движения;
- моменты времени  $t_{икор}^1$  и векторы-состояния начала проведения коррекций
- длительности проведения  $\Delta t_{тго}$  и векторы состояния КА ОГ ДЗЗ после проведения соответствующих коррекций;
- вектор-состояния любого КА ОГ ДЗЗ в любой момент времени за исключением тех, когда КА находится на техническом обслуживании.

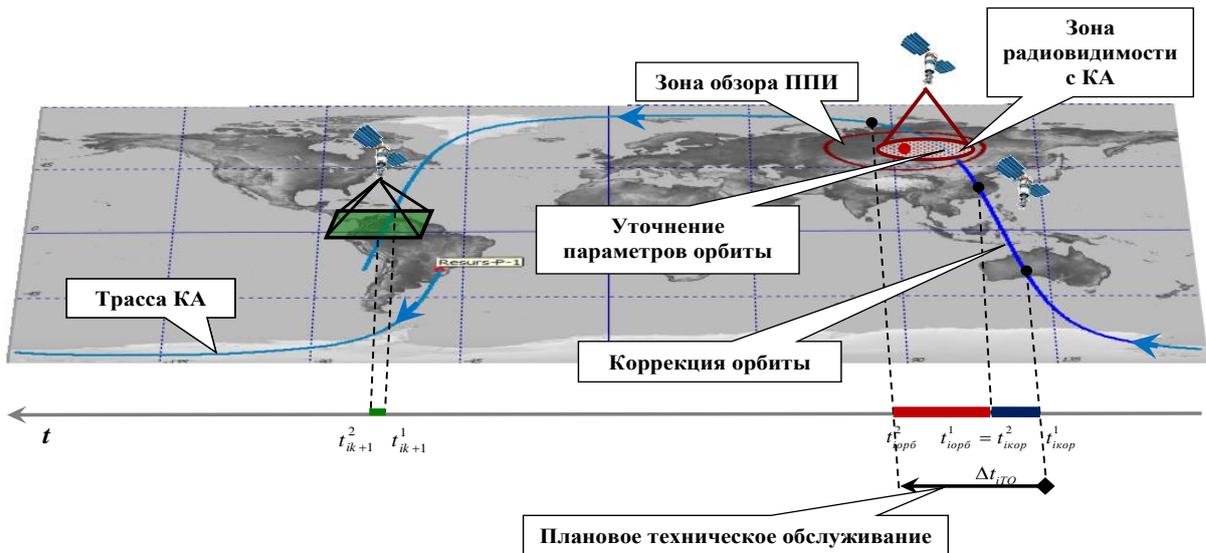


Рисунок 3.5 – Плановое техническое обслуживание и съемка объектов

Если предположить, что обработка коррекций происходит идеально и параметры орбиты на момент окончания коррекции нам известны, то для ускорения определения вектора состояния КА в любой момент времени предлагается воспользоваться следующим алгоритмом:

1. Для каждого КА ОГ ДЗЗ по моделям п.3.3 определяются интервалы между коррекциями и время, необходимое для их проведения.
2. В начале интервалов вектор состояния считается известным и соответствующим параметрам требуемой орбиты.
3. Внутри интервалов решается задача высокоточного прогнозирования состояния КА с использованием моделей п.3.1.
4. Результаты прогнозирования вектора состояния, с заданной периодичностью, сохраняются в памяти, например, один раз за виток. Одновременно сохраняются параметры трассы и географические координаты Солнца и Луны.
5. Между сохраненными в памяти значениями вектора состояния считается, что орбита является кеплеровской.

Предложенный алгоритм позволяет, с одной стороны, обеспечить достаточную точность прогноза, а с другой – существенно уменьшить время

вычислений для определения вектора состояния, трассы и условий освещенности КА.

### 3.3.2 Съёмка земных объектов

Съёмки наземных объектов производится, если выполняются условия:

- объект находится в поле зрения аппаратуры наблюдения;
- выполняются дополнительные условия, например освещенности и наличие свободной памяти в БЗУ.

Последовательности интервалов времени возможной съёмки земных объектов представляются в виде:

$$\{(t_{ik}^1, t_{ik}^2)\}, i = \overline{1, N}, k = \overline{1, K} \quad (3.87)$$

где  $t_{ik}^1$  и  $t_{ik}^2$  - моменты начала и окончания наблюдения  $i$ -м КА  $k$ -го района наблюдения.

Тогда моменты времени возможной съёмки земных объектов:

$$\{t_{ik}\}, i = \overline{1, N}, k = \overline{1, K} \quad (3.88)$$

определяются как множества таких моментов  $t_{ik} \in (t_{ik}^1, t_{ik}^2)$ , которые соответствуют минимальному углу визирования объекта

$$\theta_{ik} = \arctg \left\{ \frac{R \sin \varphi_{ik}}{r_{ik} - R \cos \varphi_{ik}} \right\}, i = \overline{1, N}, k = \overline{1, K} \quad (3.89)$$

за соответствующий интервал  $(t_{ik}^1, t_{ik}^2)$  накрытия объекта зоной обслуживания бортовой аппаратуры  $i$ -ого КА. В этом случае снимки, совершенные в эти моменты, обладают наилучшим за интервалы  $(t_{ik}^1, t_{ik}^2)$  разрешением.

Основными характеристиками аппаратуры наблюдения являются (рисунок 3.6):

- полоса захвата;
- ширина обзора;

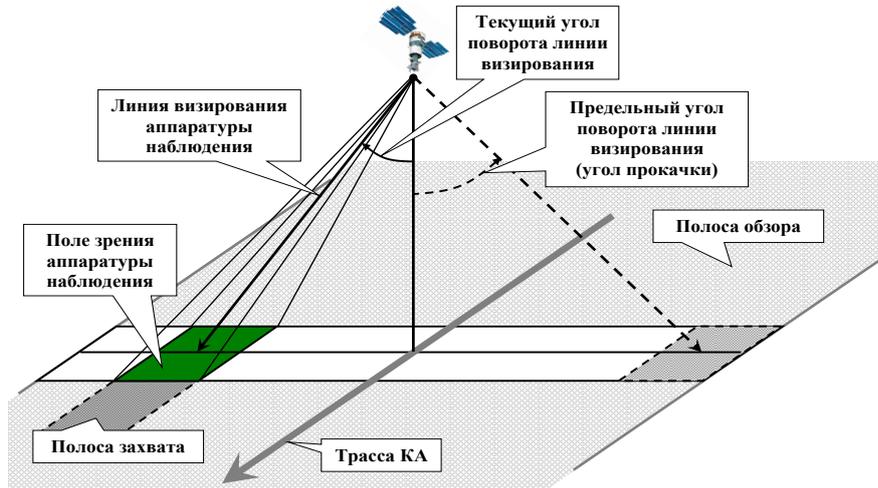


Рисунок 3.6 – Характеристики аппаратуры наблюдения

При наличии технических возможностей в аппаратуре наблюдения линия визирования может отклоняться (рисунок 3.6). Модель переориентации описывается следующим уравнением:

$$\theta_{ik+1} = \operatorname{arctg} \left\{ \frac{R \sin \varphi_{ik+1}}{r_{ik+1} - R \cos \varphi_{ik+1}} \right\} u_{ik} + \left( \theta_{ik} + \dot{\theta}_{ik} \Delta t_{ik} \right) (1 - u_{ik}), \quad i = \overline{1, N}, k = \overline{1, (k_i - 1)} \quad (3.90)$$

где  $\Delta t_{ik} = t_{ik+1} - t_{ik}$ ;  $u_{ik}$  – управляющий параметр бортовой съемочной аппаратуры  $i$ -ого КА в момент  $t_{ik+1}$ ;  $\theta_{ik+1}, \theta_{ik}$  – углы визирования земных объектов бортовой съемочной аппаратурой  $i$ -ого КА в моменты  $t_{ik+1}$  и  $t_{ik}$  соответственно;  $R$  – радиус сферической Земли;  $r_{ik+1}$  – радиус-вектор  $i$ -ого КА в момент  $t_{ik+1}$ ;  $\varphi_{ik+1}$  – угловое расстояние от надира  $i$ -ого КА до земного объекта в момент  $t_{ik+1}$ ;  $\dot{\theta}_{ik}$  – скорость переориентации бортовой съемочной аппаратуры  $i$ -ого КА на временном интервале  $(t_{ik}, t_{ik+1})$ ; начальные условия:  $\theta_{i1} = \operatorname{arctg} \left\{ \frac{R \sin \varphi_{i1}}{r_{i1} - R \cos \varphi_{i1}} \right\} u_{i0}, i = \overline{1, N}$ , угол ориентации бортовой съемочной аппаратуры КА считается нулевым до момента времени его первой съемки на интервале  $[t_0, T]$ .

Переориентация аппаратуры совершается равномерно, скорость переориентации представляет собой кусочно-постоянную функцию, участки

которой определяются парами последовательных моментов съемки земных объектов (см. рисунок 1.8):

$$\dot{\theta}_{ik} = \frac{\theta_{is} - \theta_{ir}}{t_{is} - t_{ir}}, t_{ir} \leq t_{ik} < t_{ik+1} \leq t_{is}, u_{ir-1} = u_{is-1} = 1, u_{ij} = 0, \forall j = \overline{r, s-2}, i = \overline{1, N}, k = \overline{1, k_i} \quad (3.91)$$

где  $t_{ir}, t_{is}$  - два последовательных момента времени, в которые совершается съемка земных объектов;  $\theta_{ir}, \theta_{is}$  - соответствующие съемкам углы визирования земных объектов; начальные условия:  $\dot{\theta}_{ik} = 0, \dot{\theta}_{ir} = 0, u_{ik-1} = 0 \forall k = \overline{1, (r-1)}, u_{ir-1} = 1, i = \overline{1, N}$ , и конечные условия  $\dot{\theta}_{ik} = 0, u_{ik-1} = 0 \forall k = \overline{(s+1), k_i}, u_{is-1} = 1, i = \overline{1, N}$ , - скорость переориентации бортовой съемочной аппаратуры КА считается нулевой до момента времени его первой съемки (включительно) на интервале  $[t_0, T]$  и во все моменты времени после последней съемки.

Скорость переориентации линии визирования считается постоянной (рисунок 3.7), а сам процесс переориентации бортовой съемочной аппаратуры КА характеризуется предельным углом  $\theta_{\max i}, i = \overline{1, N}$  визирования земного объекта и предельной скоростью  $\dot{\theta}_{\max i}, i = \overline{1, N}$ .

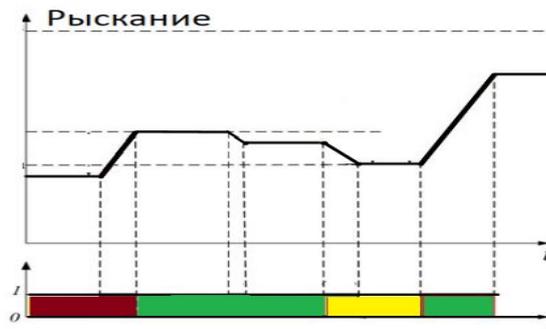


Рисунок 3.7 – Переориентация аппаратуры наблюдения

Расчет циклограммы выполняется оператором системы по исходным данным, содержащимся в конкретной заявке. Одна циклограмма может соответствовать одной заявке или нескольким заявкам, относящимся к разным достаточно близким районам съемки.

### 3.3.3 Сеансы связи

Съемки наземных объектов производится, если выполняются условия: (рисунок 3.8).

- КА находится в зоне видимости аппаратуры ППИ;
- ППИ находится в зоне видимости аппаратуры КА.

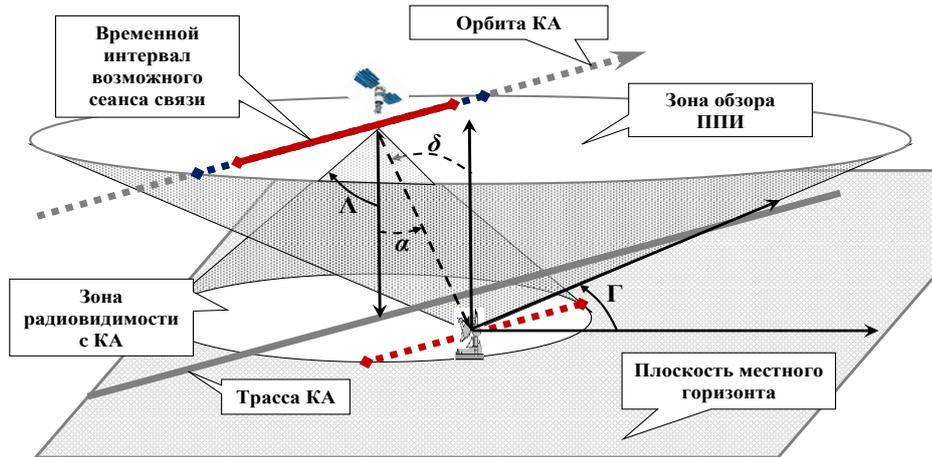


Рисунок 3.8 – Определение возможности проведения сеанса связи

Последовательности интервалов времени, в которые КА могут передавать накопленную в БЗУ информацию на ППИ, - интервалов возможных сеансов связи представляются в виде последовательностей (рисунок 3.4):

$$\{(t_{il}^1, t_{il}^2)\}, i = \overline{1, N}, l = \overline{1, L} \quad (3.92)$$

где  $t_{il}^1$  и  $t_{il}^2$  - моменты начала и окончания сеанса связи  $i$ -го КА  $l$ -м с ППИ.

Последовательностям (3.92) поставлены в соответствие последовательности порядковых номеров в сквозной нумерации (далее - номеров) ППИ:

$$\{m_{il}\}, i = \overline{1, N}, l = \overline{1, L} \quad (3.93)$$

и определяются как множества таких моментов  $t_{il} \in (t_{il}^1, t_{il}^2)$ , которые соответствуют моментам одновременной радиовидимости видимости ППИ→КА и КА→ППИ.

Таким образом, модель съемки земных объектов и сеансов связи подразумевает наличие следующих взаимосвязанных моделей:

- модели съемки земных объектов;
- модели плана передачи целевой информации на ППИ;
- модели целевой аппаратуры бортового информационного комплекса КА;
- модели расчета площади;
- модели расчета стоимости съемки земных объектов космическим аппаратом.

### **3.4 Модели съемки земных объектов**

В свою очередь, модель съемки земных объектов включает в себя:

- модель съемочного плана;
- модель съемки точечных объектов;
- модель съемки площадных объектов.

#### **3.4.1 Модель съемочного плана**

Составными частями модели съемочного плана являются:

- модели объектов съемки;
- модели для проверки выполнения условий съемки;
- модель временных последовательностей выполнения съемочных операций.

#### ***Модели объектов съемки***

Будем считать, что объект всегда представлен набором сферических полигонов: многоугольников с конечным набором вершин, имеющих заданные географические координаты  $(x_i, y_i)$ , упорядоченные по часовой стрелке, и сторонами в виде дуг большого круга. В зависимости от соотношения габаритных размеров объекта и длины сторон кадра съемочной аппаратуры объекты можно разделить на точечные и площадные (рисунок 3.9).

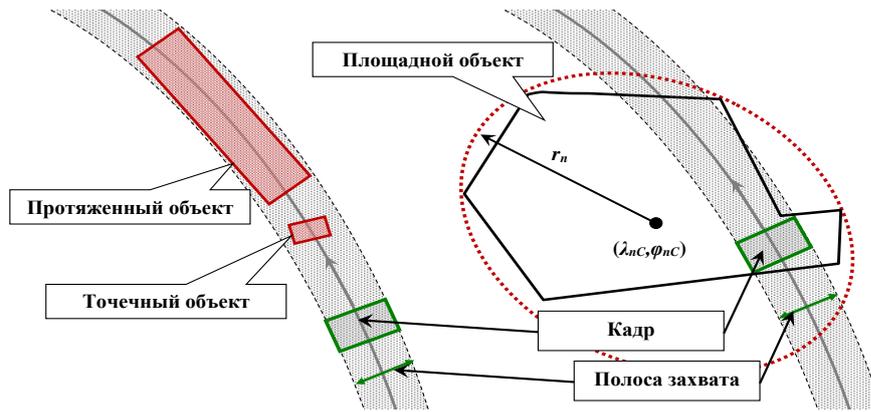


Рисунок 3.9 – Типы объектов съемки

Если сферический полигон задан географическими координатами  $n$  вершин:

$x = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$  – долготы узловых точек (вершин) полигона,

$y = (y_1, y_2, \dots, y_n)^T$  – широты узловых точек (вершин) полигона,

то, чтобы найти площадь сферического полигона можно использовать следующий алгоритм.

1. Для каждой стороны из решения обратной геодезической задачи для ее конечных вершин находятся азимуты  $\alpha_{i,i+1}$  и  $\alpha_{i+1,i}$  по формулам

$$\xi = \sin y_{i+1} \cos y_i - \cos y_{i+1} \sin y_i \cos(x_{i+1} - x_i),$$

$$\eta = \cos y_{i+1} \sin(x_{i+1} - x_i),$$

$$\alpha_{i,i+1} = \arctg \frac{\eta}{\xi}.$$

Попутно вычисляется длина стороны  $l_i$  между вершинами, т. е. сферическое расстояние между точками

$$l_i = R_E \arctg \frac{(\xi \cos \alpha_{i,i+1} + \eta \sin \alpha_{i,i+1})}{\sin y_i \sin y_{i+1} + \cos y_i \cos y_{i+1} \cos(x_{i+1} - x_i)}$$

2. Для каждой вершины по азимутам  $\alpha_{i,i-1}$  в предыдущую и  $\alpha_{i,i+1}$  в последующую вершины вычисляется поворот  $\tau_i = \pi - \vartheta_i = \pi - (\alpha_{i,i-1} - \alpha_{i,i+1})$  и добавляется к полному повороту  $\tau$ .

3. Вычисляется сферический избыток  $\varepsilon$

$$\varepsilon = 2\pi - \tau = 2\pi - \sum_{i=1}^n \tau_i$$

4. Определяется искомая площадь сферического полигона  $S_n$   $n$ -го объекта по формуле

$$S_n = \varepsilon R_E^2 \quad (3.94)$$

и его периметр:

$$P_n = \sum_{i=1}^{n-1} l_i \quad (3.95)$$

Если полигональный образ  $n$ -го объекта представляет собой сферическую трапецию, то его площадь можно найти по более простой формуле [92]

$$S_n = R_E^2 |(\lambda_2 - \lambda_1)| |(\sin \varphi_2 - \sin \varphi_1)| \quad (3.96)$$

где  $\lambda_1, \lambda_2$  – долготы ограничивающих меридианов,  $\varphi_1, \varphi_2$  – широты ограничивающих параллелей, углы заданы в радианах.

Если полигон настолько мал, что сферический избыток сравним с погрешностью его вычисления, можно перейти к вычислениям площади на плоскости. В этом случае применима формула шнурования

$$S_n = \frac{1}{2} \left| \sum_{i=1}^{N-1} x_i y_{i+1} + x_N y_1 - \sum_{i=1}^{N-1} x_{i+1} y_i - x_1 y_N \right| \quad (3.97)$$

в которой  $x_i, y_i, i = 1, 2, \dots, N$  – декартовы координаты вершин полигона,  $N$  – число вершин, причем  $y_0 = y_N$ .

Пусть  $s_k = l_x l_y$  – площадь кадра съемочной камеры, где  $l_x$  и  $l_y$  – линейные размеры кадра поперек и вдоль трассы КА соответственно.

Если площадь объекта  $S_n \leq s_k$ , то объект считается либо точечным, либо протяженным.

Помимо набора пар координат  $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$  и  $y = (y_1, y_2, \dots, y_n)^T$ , площади  $S_n$  и периметра  $P_n$   $n$ -й площадной объект характеризуется географическими долготой и широтой геометрического центра  $(\lambda_{nC}, \phi_{nC})$  и габаритными угловыми радиусами  $r_n^{\max}$  и  $r_n^{\min}$ , которые вычисляются по формулам:

$$\lambda_{nC} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad \phi_{nC} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i, \quad (3.98)$$

$$r_n^{\max} = \max_i \sqrt{(x_i - \lambda_{nC})^2 + (y_i - \phi_{nC})^2}, \quad r_n^{\min} = \min_i \sqrt{(x_i - \lambda_{nC})^2 + (y_i - \phi_{nC})^2} \quad (3.99)$$

Очевидно, что сферический полигон, являющийся геометрическим образом  $n$ -го объекта, целиком находится внутри круга радиусом  $r_n^{\max}$  с центром в точке  $(\lambda_{nC}, \phi_{nC})$ . Объект, у которого габаритная ширина  $l_{nX} < l_x$  и  $S_n > s_k$  можно назвать протяженно-площадным (рисунок 3.9); для такого объекта выполнены ограничения на габаритные размеры  $l_{nX}$  и  $l_{nY}$ , измеряемые вдоль главных осей инерции полигонального образа объекта:

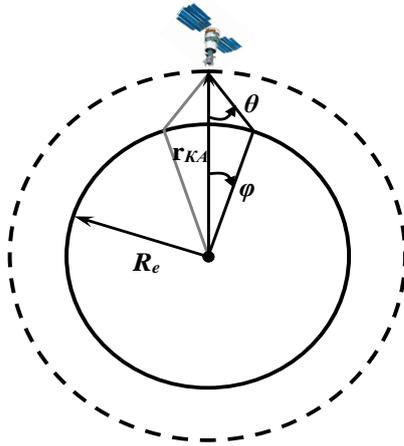
$$l_{nX} \leq l_x, \quad l_y < l_{nY} \leq v_{KA} \tau_{cm}^{\max},$$

где  $v_{KA}$  – скорость подспутниковой точки,  $\tau_{cm}^{\max}$  – максимальное время непрерывной съемки – характеристика БИК КА.

### **Методика расчета углов съемки**

Пусть  $\theta$  – угол визирования объекта, т.е. угол между направлением спутник-надир и направлением оптической оси съемочной камеры спутник-фиксированная точка (например, центр) объекта,  $\varphi$  – угол между направлением центр Земли-спутник и центр Земли – фиксированная точка объекта. Величину  $\theta$  можно интерпретировать как угловой радиус поля обзора бортовой аппаратуры КА (рисунок 3.10), углы  $\theta$  и  $\varphi$  связаны соотношением [62, 95, 109]:

$$\theta = \arctan \frac{\sin \varphi}{\frac{r_{KA}}{R_e} - \cos \varphi} = \arctan \frac{\sin \varphi}{(1 + h / R_e) - \cos \varphi} \quad (3.100)$$

Рисунок 3.10 – Связь углов  $\theta$  и  $\varphi$ 

Для проведения съемки угол  $\theta$  может меняться в пределах от 0 до  $\theta_{max}$  в зависимости от типа объекта и значения управляющего параметра. Соответствующий величине  $\theta_{max}$  геоцентрический угловой радиус полосы обзора со спутника определяется соотношением [109]

$$\varphi_{max} = \arcsin[(1 + h / R_e) \sin \theta_{max}] - \theta_{max} \quad (3.101)$$

Зная ширину кадра  $l_x$ , можно описать угловые границы полосы захвата выражением

$$\theta_z = \theta \pm \arctan \frac{l_x}{2h} \quad (3.102)$$

Применяя формулы (3.100) и (3.102) для записанных в эфемеридной таблице моментов времени, относящихся к  $j$ -му витку, и соответствующих географических координат точек трассы, можно рассчитать наборы координат узловых точек, задающих границы полосы захвата (полосы съемки). Полилинии, построенные по узловым точкам, можно рассматривать как оцифрованные кривые, описывающие контур полигонального образа полосы захвата  $i$ -го КА на  $j$ -ом витке.

При многопроходной съемке площадных объектов величиной  $\theta$  в правой части (3.102) необходимо управлять.

### **Методика проверки внешних условий съемки**

К внешним условиям, оказывающим прямое влияние на качество съемки оптико-электронной аппаратурой КА, относятся освещенность снимаемых объектов и наличие облачности над районом в момент съемки.

Уровень освещенности наземного объекта солнечным светом определяется, главным образом, углом возвышения Солнца  $h_{\otimes}$  над горизонтом объекта в момент съемки. Величина этого угла зависит от широты места расположения объекта, дня года и местного времени суток в момент съемки. Максимальная величина угла возвышения для данного типа аппаратуры наблюдения КА является дополнительным условием возможности выполнения сеанса наблюдений.

Угол возвышения Солнца  $h_{\otimes}$  в точке земной поверхности с географическими широтой  $\varphi$  и долготой  $\lambda$  может быть рассчитан с помощью соотношения [62, 109]:

$$\sin h_{\otimes} = \sin \delta_{\otimes} \sin \varphi + \cos \delta_{\otimes} \cos \varphi \cos \Delta\lambda_{\otimes} \quad (3.103)$$

где  $\delta_{\otimes}$  – угол склонения Солнца,  $\Delta\lambda_{\otimes} = \lambda_{\otimes} - \lambda$  – разность между долготой Солнца  $\lambda_{\otimes}$  и меридианом точки  $\lambda$ .

Долгота Солнца в заданный момент московского времени  $t$  (в часах) рассчитывается с помощью следующих выражений:

$$\text{– в зимнее время:} \quad \lambda_{\otimes} = \omega_E [12 - (t - 1 - \eta_{\otimes})] + 30^\circ \quad (3.104)$$

$$\text{– в летнее время:} \quad \lambda_{\otimes} = \omega_E [12 - (t - 2 - \eta_{\otimes})] + 30^\circ, \quad (3.105)$$

где  $\omega_E$  – угловая скорость вращения Земли относительно своей оси, измеренная в град. в час;  $\eta_{\otimes}$  – переменная, называемая «уравнением времени».

Московское и гринвичское время связаны между собой соотношением:

$$t_{mos} = t_{gr} + 3.$$

Угол склонения Солнца  $\delta_{\otimes}$  и уравнение времени  $\eta_{\otimes}$  являются функциями текущей даты года [62, 109]. Пусть  $d$  – номер дня в году (от 1 января текущего года),

$$\beta = \frac{2\pi}{365}(d - 81) \text{ – угол, определяющий видимое движение среднего Солнца и}$$

отсчитываемый от даты весеннего солнцестояния.

Угол склонения Солнца  $\delta_{\otimes}$  определяется формулой

$$\delta_{\otimes} = \arcsin(\sin \varepsilon \sin \beta) \quad (3.106)$$

где  $\varepsilon$  – угол между плоскостью экватора Земли и плоскостью эклиптики ( $\approx 23,45^\circ$ ).

Уравнение времени  $\eta_{\otimes}$ , выраженное в минутах, имеет вид

$$\eta_{\otimes} = 7,53 \cos \beta + 1,5 \sin \beta - 9,87 \sin 2\beta \quad (3.107)$$

Полученные путем проведения баллистических расчетов моменты съемки объектов, для которых требования по освещенности не выполняются, исключаются из дальнейшего рассмотрения. Эти моменты выявляются путем сравнения угла возвышения Солнца  $h_{\otimes}$  с его минимально допустимой величиной  $h_{\otimes}^{\min}$ . Последняя, в зависимости от характеристик бортовой съемочной аппаратуры, может составлять  $10 \div 25$  град.

### 3.4.2 Съемка точечных объектов

Возможность съемки точечных земных объектов определяется предельным углом отклонения линии визирования бортовой съемочной аппаратуры КА от направления в надир (рисунок 3.11).

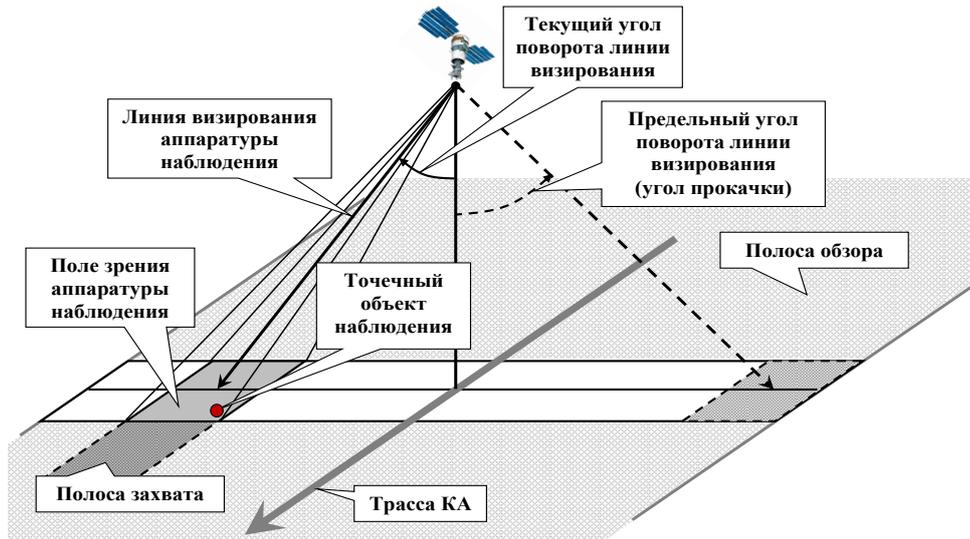


Рисунок 3.11 – Возможность съемки точечных земных объектов

Предложенную модель можно упростить, если зону обслуживания представить в виде конуса. Тогда точечный объект будет находиться внутри зоны обслуживания КА с угловым радиусом  $\varphi_{\max}$ , когда текущий геоцентрический угол  $\gamma(t)$  между центром объекта и направлением на КА удовлетворяет неравенству

$$\varphi_{\max} \geq \gamma(t) .$$

Моменты входа  $t_{ik}^1$  и выхода  $t_{ik}^2$  точечного  $n_{ik}$ -го объекта в зону обслуживания  $i$ -го КА определяются из равенств:

$$\varphi_{\max} = \gamma(t_{ik}^1), \quad \varphi_{\max} = \gamma(t_{ik}^2), \quad t_{ik}^1 \leq t_{ik}^2 \quad (3.108)$$

в которых угловое расстояние  $\gamma(t)$  вычисляется по формуле [62, 109]

$$\gamma(t) = \arccos \frac{(\bar{r}_{ка\delta}(t), \bar{r}_{n_{ik}})}{|\bar{r}_{ка\delta}(t)| |\bar{r}_{n_{ik}}|} \quad (3.109)$$

где  $\bar{r}_{ка\delta}(t)$  и  $\bar{r}_{n_{ik}}$  – радиусы-векторы центра кадра и  $n_{ik}$ -го объекта в декартовой гринвичской системе координат. Координаты центра кадра определяются через координаты  $(\lambda_{КА}, \phi_{КА})$  точки трассы и величину текущего угла визирования  $\theta_{ik}$ . Вместо формулы (3.109) угловое расстояние  $\gamma(t)$  можно определять с

использованием географических координат  $(\lambda_{кад}, \phi_{кад})$  текущего положения центра кадра КА и координат  $(\lambda_{n_{ik}}, \phi_{n_{ik}})$  центра объекта по формуле

$$\gamma(t) = \arccos[\sin \phi_{кад}(t) \sin \phi_{n_{ik}} + \cos \phi_{кад}(t) \cos \phi_{n_{ik}} \cos \Delta\lambda(t)] \quad (3.110)$$

где  $\Delta\lambda(t) = \lambda_{кад}(t) - \lambda_{n_{ik}}$  – разница долгот центра кадра и объекта.

Для точечного объекта вместо использования процедуры минимизации (3.89) предлагается определять момент начала съемки по формуле

$$t_{ik} = \frac{t_{ik}^1 + t_{ik}^2}{2} \quad (3.111)$$

Найденные по (3.111) моменты  $t_{ik}$  записываются в последовательность только при выполнении условия достаточной освещенности

$$h_{\otimes}(t_{ik}) \geq h_{\otimes}^{\min} \quad (3.112)$$

проверка которого проводится с использованием формул (3.103)-(3.107).

Порядковые номера в сквозной нумерации (далее - номера) земных объектов, которые могут быть сняты в моменты  $t_{ik}$ , представляются в виде последовательностей:

$$\{n_{ik}\}, i = \overline{1, N}, k = \overline{1, k_i}, n_{ik} \in \{1, 2, \dots, H\}, \quad (3.113)$$

где  $H$  - общее количество земных объектов, подлежащих съемке за интервал  $[t_0, T]$ .

### 3.4.3 Особенности съемки площадных объектов

Как уже упоминалось, предполагается, что обслуживание площадных объектов может выполняться:

- а) многопроходной съемкой, выполняемой в надир (без переориентации оси визирования камеры) одним или несколькими однотипными КА на разных витках (рисунок 3.12а),
- б) многопроходной съемкой, выполняемой с переориентацией оси визирования камеры одним или несколькими однотипными КА на разных витках, реализация этого режима требует согласованного назначения угла визирования  $\theta$  от прохода к проходу;

- с) съемкой в азимутальном режиме, реализуемом одним КА за счет синхронизированного программного разворота по тангажу и крену (рисунок 3.12б); представляется, что использование такого режима наиболее подходит для маршрутов съемки протяженно-площадных объектов, имеющих высокий приоритет,
- д) одновитковой двухполосной съемкой со скачкообразной переориентацией оси визирования камеры по тангажу и крену после первого прохода (рисунок 3.12в); представляется, что использование такого режима наиболее подходит для маршрутов съемки протяженно-площадных объектов двойной габаритной ширины, имеющих очень высокий приоритет.

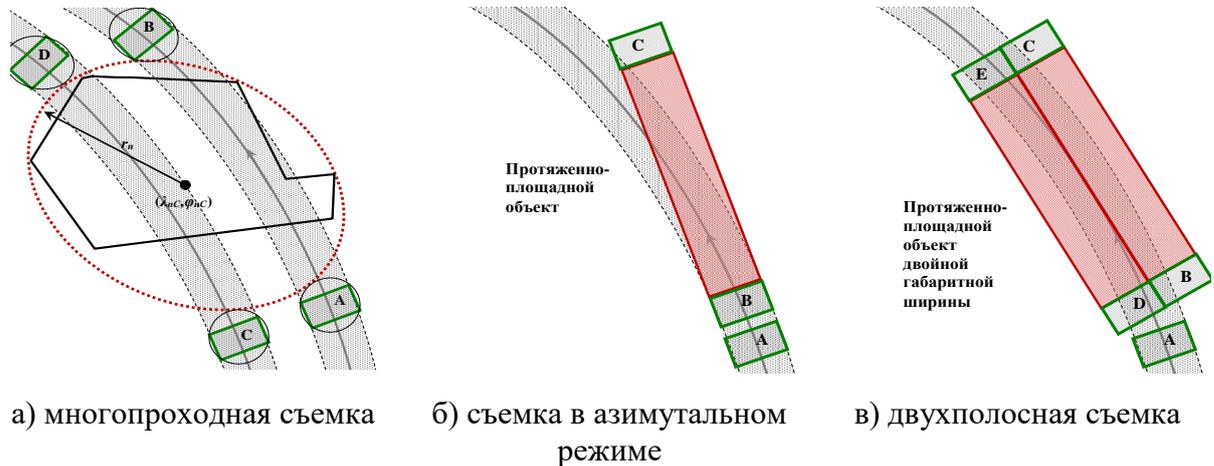


Рисунок 3.12 – Съемка площадных объектов

Съемка площадного объекта в режиме а) может выполняться, когда текущее угловое расстояние  $\gamma(t)$  между геометрическим центром объекта с координатами  $(\lambda_{nC}, \varphi_{nC})$  и центром кадра с координатами  $(\lambda_{КА}, \varphi_{КА})$  удовлетворяет неравенству

$$\gamma(t_{ik}^1) - l^*(l_x, l_y) \leq r_{n_{ik}}, \quad (3.114)$$

где  $r_{n_{ik}}$  – габаритный радиус  $n_{ik}$ -го объекта (см. п.3.5),  $l^*(l_x, l_y)$  – угловой радиус круга, описанного около кадра с линейными размерами  $l_x \times l_y$ .

Положения кадра, обозначенные на рисунке 3.12а как А, В, С, D, соответствуют таким моментам, когда неравенство (3.114) превращается в

равенство. В частности, моменты времени, задающие положения А и С можно считать моментами начала съемки: кадр начинает входить в область, ограниченную габаритным радиусом объекта; а моменты времени, задающие положения В и D можно считать моментами окончания съемки: кадр вышел за пределы габаритной области.

При съемке в режиме б) в соотношении (3.114) координаты  $(\lambda_{КА}, \varphi_{КА})$  следует трактовать не как координаты точки трассы, а как координаты центра кадра и вычислять координаты границ полосы съемки с учетом текущего угла визирования  $\theta$  (управляемый параметр) по формулам (3.102). Фактически при съемке в режиме б) площадной объект заменяется совокупностью смежных фрагментов, «вырезаемых» полосами съемки в последовательных проходах КА над объектом. Съемка такого фрагмента идентична съемке протяженного объекта.

Таким образом, считается, что моменты начала  $t_{ik}^1$  и окончания  $t_{ik}^2$  съемки определяются равенствами

$$\gamma(t_{ik}^1) - l^* = r_{n_{ik}}, \quad \gamma(t_{ik}^2) - l^* = r_{n_{ik}}, \quad t_{ik}^1 < t_{ik}^2 \quad (3.115)$$

в которых текущее угловое расстояние  $\gamma(t)$  вычисляется по формулам (3.109) или (3.110),  $r_{n_{ik}}$  – по формулам (3.98) и (3.99), а  $l^*$  – по формуле

$$l^* = \frac{\sqrt{l_x^2 + l_y^2}}{R_E} \quad (3.116)$$

Найденные по (3.115) моменты  $t_{ik}$  записываются в последовательность (3.88) только при выполнении условий достаточной освещенности (3.112):

$$h_{\otimes}(t_{ik}^1) \geq h_{\otimes}^{\min}, \quad h_{\otimes}(t_{ik}^2) \geq h_{\otimes}^{\min},$$

и выполнении ограничения на количество облачности, проверка которых проводится с использованием формул (3.103)-(3.107). При этом расчетное время съемки на данном витке

$$\tau_{см} = t_{ik}^2 - t_{ik}^1 \quad (3.117)$$

Алгоритм, основанный на применении формул (3.114)-(3.117) применим и для протяженно-площадных объектов (рисунки 3.12 ав). Однако, в зависимости от

ориентации и соотношения габаритной длины и ширины таких объектов время «холостой» съемки может быть значительным (рисунок 3.13).

При этом алгоритм расчета временных интервалов съемки площадных объектов необходимо выбирать в зависимости от фактора формы, и ориентации полигонального образа объекта относительно трассы (т.е. с учетом соотношения азимута  $A_{КА}(t_{ik}^1)$  текущего вектора скорости КА в момент предположительного начала съемки и  $A_n$ ). Возможны следующие признаки включения/выключения аппаратуры: по габаритному кругу и по габаритной ширине (рисунок 3.13)

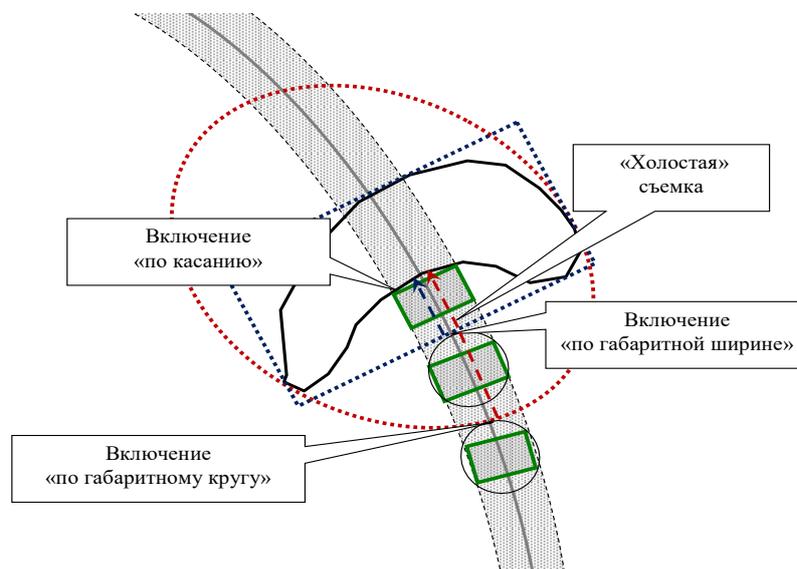


Рисунок 3.13 – Включение/выключения аппаратуры  
«по габаритному кругу» и «по габаритной ширине»

Наибольшее время «холостой» съемки площадного объекта применение формул (3.114)-(3.117) может давать тогда, когда число вершин  $n \geq 5$ , полигон имеет сильно вытянутую дугообразную форму и угол между направлениями  $A_{КА}(t_{ik}^1)$  и  $A_n$  близок к  $90^\circ$ . В такой ситуации логично вместо включения/выключения «по габаритному кругу» использовать включение/выключение «по габаритной ширине» (рис. 3.13).

В ситуациях, когда ориентация объекта более «попутная», т.е. разница в азимутах меньше, выполняется неравенство

$$|\cos(A_{КА}(t_{ik}^1) - A_n)| > \varepsilon_A,$$

и тогда следует использовать соотношения (3.113) и (3.114), а также при высоком приоритете объекта в качестве альтернативы планировать съемку в азимутальном режиме или двухполосную съемку (если габаритная ширина объекта превышает удвоенную ширину кадра).

Порядковые номера в сквозной нумерации (далее - номера) наземных объектов, которые могут быть сняты в моменты  $t_{ik}$ , представляются в виде последовательностей:

$$\left\{ n_{ik} \right\}, \quad i = \overline{1, i^*}, \quad k = \overline{1, k_i^*}, \quad n_{ik} \in \{1, 2, \dots, N\}, \quad (3.118)$$

где  $N$  – общее количество земных объектов, подлежащих съемке группировкой КА за интервал  $[0, T]$ . Последовательности углов (3.108) и номеров (3.118) строго соответствуют последовательностям (3.88).

### 3.5 Модель передачи целевой информации между КА и ППИ

#### 3.5.1 Методика расчета условий радиовидимости

КА считается «наблюдаемым» из некоторой точки на Земле, если угол между направлением на спутник из этой точки и плоскостью местного горизонта (т.е. угол места  $\delta(t)$ ) не меньше заданного  $\delta(t) \geq \delta^*$  (рисунок 3.14).

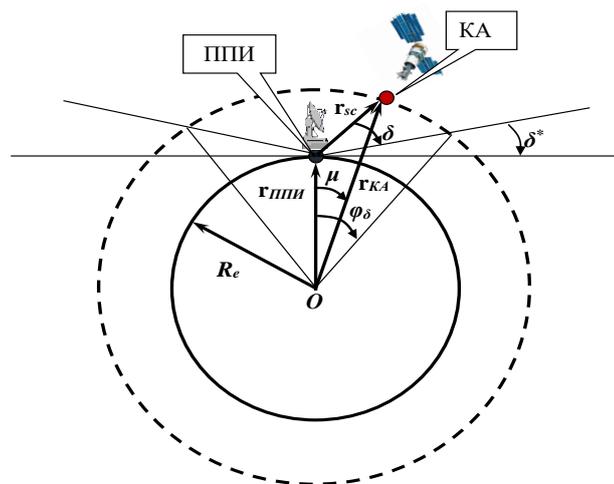


Рисунок 3.14 – Условие радиовидимости ППИ→КА

Ограничение на угол места снизу необходимо для учета рельефа местности, близлежащих строений и т.д. Условия радиовидимости могут быть сформулированы либо в абсолютной геоцентрической экваториальной системе координат, либо в географической СК. Поскольку эфемеридная таблица содержит координаты точек трассы КА, то проверка условий радиовидимости проводится в географических координатах.

Угловой геоцентрический радиус зоны обзора ППИ определяется выражением [62, 109] (рисунок 3.14)

$$\varphi_{\delta} = \arccos \left[ R_E \cos \delta^* / r_{KA} \right] - \delta^* \quad (3.119)$$

Выражение для дальности  $D$  от ППИ до КА следует из теоремы косинусов

$$D = \sqrt{r_{KA}^2 + R_E^2 - 2r_{KA}R_E \cos \varphi} \quad (3.120)$$

Угловое расстояние  $\mu$  между ППИ и подспутниковой точкой находится из равенства

$$\cos \mu(t) = \sin \varphi(t) \sin \varphi_{ППИ} + \cos \varphi(t) \cos \varphi_{ППИ} \cos (\lambda(t) - \lambda_{ППИ}) \quad (3.121)$$

где  $\lambda(t)$ ,  $\varphi(t)$  и  $\lambda_{ППИ}$ ,  $\varphi_{ППИ}$  – географические долгота и широта КА и ППИ соответственно. Условие видимости КА с заданного ППИ имеет вид

$$[\mu(t) \leq \varphi_{\delta}] \ \& \ [D(t) \leq D_{\max}] \quad (3.122)$$

где  $D_{\max}$  – максимальная дальность связи (техническая характеристика ППИ).

ППИ находится внутри зоны радиовидимости КА с угловым радиусом  $\varepsilon$ , когда текущий геоцентрический угол  $\zeta$  направления на ППИ удовлетворяет неравенству (рисунок 3.15):

$$\varepsilon \leq \zeta \quad (3.123)$$

в которых угловое расстояние  $\varepsilon$  вычисляется по формуле [62]

$$\varepsilon = \arccos \frac{(\mathbf{r}_{sc}, \mathbf{r}_{KA})}{|\mathbf{r}_{sc}| |\mathbf{r}_{KA}|} \quad (3.124)$$

где  $\mathbf{r}_{sc}$  и  $\mathbf{r}_{KA}$  – радиусы-векторы направления на ППИ и центр Земли соответственно.

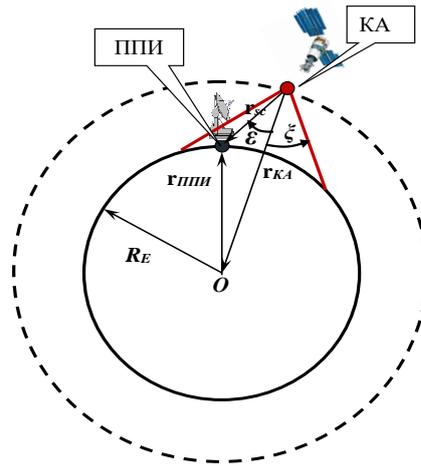


Рисунок 3.15 – Условие радиовидимости КА→ППИ

Таким образом, общим условием радиовидимости является:

$$[\mu(t) \leq \varphi_\delta] \ \& \ [D(t) \leq D_{\max}] \ \& \ [\varepsilon \leq \xi] \quad (3.125)$$

### 3.5.2 Модель наземной инфраструктуры ППИ

Пусть  $m$  – номер ППИ,  $M$  – общее число ППИ в составе наземной инфраструктуры,  $m \in [1, 2, \dots, M]$ . Для проверки условий радиовидимости используются такие характеристики  $m$ -го ППИ как:

- $\lambda_m, \varphi_m$  – географические долгота и широта местоположения ППИ,
- $\delta_m^*$  – минимальный угол места, зависящий от рельефа окружающей местности и наличия высотных сооружений в ближайшей окрестности,
- $D_m^*$  – максимальная дальность радиосвязи, которую обеспечивает приемо-передающий комплекс ППИ.

Помимо указанных дополнительно вводится характеристика булевского типа

$\chi_{im}$  – переменная, отражающая принципиальную возможность связи  $i$ -го КА с  $m$ -м ППИ и принимающая значение *true* только для тех ППИ, которые обеспечивают прием данных  $i$ -го КА.

### 3.5.3 Модель временных последовательностей сеансов связи с ППИ

Граничные точки интервалов радиовидимости  $(t_{il}^1, t_{il}^2)$  определяются из уравнений

$$\mu(t_{il}^1) = \varphi_{\delta m}, \quad \mu(t_{il}^2) = \varphi_{\delta m}, \quad t_{il}^1 < t_{il}^2, \quad m \in [1, 2, \dots, M] \quad (3.126)$$

в которых используются долгота, широта и угловой радиус зоны радиовидимости  $m$ -го ППИ. Попутно контролируется выполнение условия по дальности и радиовидимости КА→ППИ (3.125).

Последовательности интервалов времени, в которые КА могут передавать накопленную в БЗУ информацию на ППИ, - интервалов возможных сеансов связи представляются в виде последовательностей:

$$\{(t_{il}^1, t_{il}^2)\}, \quad i = \overline{1, i^*}, \quad l = \overline{1, l_i^*}, \quad (3.127)$$

где  $t_{il}^1$  и  $t_{il}^2$  - моменты входа и выхода  $i$ -ого КА из зоны радиовидимости ППИ;  $l_i^*$  - количество возможных сеансов связи  $i$ -ого КА за интервал  $[0, T]$ . На рисунке 3.8 интервал  $(t_{il}^1, t_{il}^2)$  соответствует участку трассы  $i$ -ого КА, расположенному в пределах зон совместной радиовидимости ППИ и КА.

Последовательностям (3.127) поставлены в соответствие последовательности порядковых номеров в сквозной нумерации (далее - номеров) ППИ:

$$\{m_{il}\}, \quad i = \overline{1, i^*}, \quad l = \overline{1, l_i^*}, \quad m_{il} \in \{1, 2, \dots, M\}, \quad (3.128)$$

где  $M$  – общее количество ППИ.

### 3.6 Модели целевой аппаратуры КА

Модель целевой аппаратуры КА включает в себя:

- модель изменения памяти бортового запоминающего устройства;
- модель переориентации линии визирования.

#### 3.6.1 Модель изменения памяти в БЗУ

Допущениями при формировании модели изменения памяти в бортовом запоминающем устройстве являются следующие:

- аппаратура наблюдения имеет всего два возможных состояния – включена, если ведется наблюдение и выключена, когда КА находится в режиме ожидания съемки;
- приемно-передающая аппаратура также имеет два состояния – включена, если происходит обмен данными и выключена, когда КА находится в режиме ожидания сеанса связи;
- возможно одновременное включение этих режимов.

Считается, что в процессе съемки занятый объем БЗУ увеличивается линейно по времени, в процессе сброса – уменьшается также линейно. Скорость роста зависит от числа одновременно работающих камер, а скорость сброса определяется производительностью передающей аппаратуры. Приращение занятого объема БЗУ определяется суммарным объемом снимков одновременно задействованных камер наблюдения. Если работает одна камера, то приращение объема равно объему одного снятого маршрута, если камер несколько, то приращение есть сумма объемов снимков с каждой камеры. В любом случае, приращение занятого объема БЗУ пропорционально длительности участка съемки очередного маршрута:

$$\Delta V^+ = w^+(m) \cdot \tau_{cm}, \quad (3.129)$$

где  $w^+(m)$  – суммарная скорость поступления в БЗУ видеоданных с  $m$  камер,  $\Delta V^+$  – приращение объема БЗУ,  $\tau_{cm}$  – длительность участка съемки.

Пусть  $i$  – номер КА,  $i = \overline{1, i^*}$ ,  $i^*$  – число КА в группировке;  $k$  – номер очередного участка съемки,  $k = \overline{0, k_i^* - 1}$ ,  $k_i^*$  – общее число участков возможной съемки  $i$ -ым КА на всем интервале планирования;  $n$  – номер объекта съемки,  $n = \overline{1, N}$ ,  $N$  – общее число всех объектов, подлежащих съемке на интервале планирования;  $l$  – номер участка сброса,  $l = \overline{1, L_i}$ . Поскольку конкретный КА снимает не все объекты подряд, обозначим  $n_{ik}$  – номер объекта, снимаемого  $i$ -ым КА, начиная с момента  $t_{ik}$ .

Уменьшение занятого объема БЗУ  $\Delta V^-$  за счет сброса пропорционально длительности  $l$ -го участка сброса  $\tau_{il}$  (участка радиовидимости):

$$\Delta V_{il}^- = w_i^- \tau_{il}, \quad (3.130)$$

где  $w_i^-$  – скорость передачи информации - производительность передающей аппаратуры  $i$ -ого КА

Длительность участка съемки  $\tau_{см}$  очередного маршрута зависит от габаритных размеров объекта съемки и взаимного расположения объекта съемки и трассы:  $\tau_{см} = \tau_{см}(n_{ik})$ :

$$\tau_{см}(n_{ik}) = \frac{L_{n_{ik}}}{v_{КА_i}}, \quad (3.131)$$

где  $L_{n_{ik}}$  – длина  $n_{ik}$ -го объекта вдоль трассы,  $v_{КА_i}$  – скорость подспутниковой точки  $i$ -го КА.

Наблюдение земных объектов, сохранение данных в БЗУ, передача данных на ППИ приводит к изменению объема памяти БЗУ КА. Модель динамики состояния БЗУ описывается следующим уравнением [80]:

$$V_{ik+1} = \Delta V_{n_{ik}}^+ u_{ik}^+ + \max \left\{ V_{ik}^- - \Delta V_{ik}^- u_{ik}^-; 0 \right\}, \quad i = \overline{1, i^*}, \quad k = \overline{0, k_i^* - 1}, \quad (3.132)$$

или

$$V_{ik+1} = \Delta V_{n_{ik}}^+ u_{ik}^+ + \max \left\{ V_{ik}^- - \Delta t_{ik} b_{ik} w_i^- u_{ik}^-; 0 \right\}, \quad i = \overline{1, i^*}, \quad k = \overline{0, k_i^* - 1}, \quad (3.133)$$

где  $\Delta t_{ik} = t_{ik+1} - t_{ik}$  – продолжительность интервала времени между двумя последовательными моментами включения съемочной аппаратуры  $i$ -го КА;  $u_{ik}^+$  – параметр управления включением бортовой съемочной аппаратуры  $i$ -ого КА в момент  $t_{ik}$ , которому назначается значение 1 с момента  $t_{ik}$  на участке длительностью  $\tau_{см}(n_{ik})$ , т.е. аппаратура включена, и 0 в противном случае;

$u_{ik}^-$  – параметр управления сбросом, т.е. включением передающей аппаратуры  $i$ -ого КА на отрезке  $\Delta t_{ik}$ , которому назначается значение 1 на участке(ах)

длительностью  $\tau_{il}$  при условии  $t_{ik} < t_{il} < t_{ik+1}$ , т.е. аппаратура включена, и 0 в противном случае;

$V_{ik+1}$  - объем информации, накопленной в БЗУ  $i$ -ого КА к моменту  $t_{ik+1}$ ;

$V_{ik}$  - объем информации, накопленной в БЗУ  $i$ -ого КА к моменту  $t_{ik}$ ;

$\Delta V_{n_{ik}}^+$  - объем информации, поступившей в БЗУ  $i$ -ого КА к моменту

$t_{ik} + \tau_{см}(n_{ik})$  при съемке  $n_{ik}$ -ого объекта;

$\Delta V_{ik}^-$  - объем информации, сброшенной из БЗУ  $i$ -ого КА на интервале  $\Delta t_{ik}$ ;

$b_{ik}$  - доля  $\Delta t_{ik}$ , приходящаяся на передачу информации из БЗУ  $i$ -ого КА;

$$b_{ik} = \sum_l \tau_{il} / \Delta t_{ik}, \quad \forall \tau_{il} = t_{il}^2 - t_{il}^1 : t_{ik} \leq t_{il}^1 \leq t_{il}^2 \leq t_{ik+1} \quad (3.134)$$

Учет сбрасываемого из БЗУ объема данных с применением формулы (3.134) обусловлен тем обстоятельством, что скорость записи  $w^+$  на порядок выше скорости сброса  $w^-$ . Поэтому на один сеанс съемки в среднем должно приходиться несколько сеансов сброса.

Для использования соотношения (3.132) или (3.133) необходимы начальные условия:

$$V_{i1} = V_{n_{i0}} u_{i0}^+, \quad i = \overline{1, i^*}. \quad (3.135)$$

Модель (3.132, 3.133) поясним на примере (рисунок 3.16). Первое слагаемое в правой части учитывает объем записываемой в БЗУ информации в момент  $t_{ik} + \tau_{см}(n_{ik})$ : поскольку  $u_{ik}^+ = 1$  на участке длительностью  $\tau_{см}$ , то объект снимается и БЗУ пополняется объемом  $\Delta V_{n_{ik}}^+$  информации; если объект не снимается, то  $u_{ik}^+ = 0$ , и БЗУ не пополняется информацией (слагаемое обращается в 0).

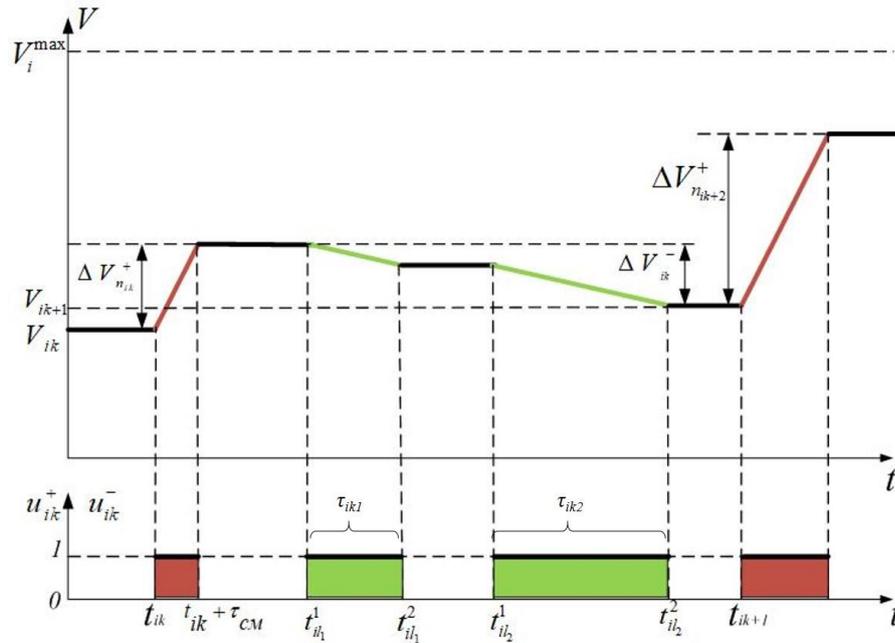


Рисунок 3.16 – Модель изменения объема БЗУ КА

Второе слагаемое в (3.132, 3.133) учитывает объем переданной из БЗУ информации за интервал  $\Delta t_{ik}$ . Если внутри интервала  $\Delta t_{ik}$  функция  $u_{ik}^- = 1$  хотя бы на одном отрезке  $\tau_{ik}$  (на рисунке – на двух), то относительная величина  $b_{ik} > 0$ , информация передается и  $\Delta V_{ik}^- > 0$ . Если на всем интервале  $\Delta t_{ik}$  функция  $u_{ik}^- = 0$ , то информация не передается, т.е.  $b_{ik} = 0$ , и к моменту  $t_{ik+1}$  в БЗУ содержится объем  $V_{ik} + \Delta V_{ik}^+$  информации; если была передана вся информация, то к моменту  $t_{ik+1}$  в БЗУ нет информации (слагаемое обращается 0); если была передана часть объема  $V_{ik}$  информации, то к моменту  $t_{ik+1}$  в БЗУ накоплена информация в объеме (как на рисунке):

$$V_{ik} + \Delta V_{ik}^+ - \Delta V_{ik}^- = V_{ik} + \Delta V_{ik}^+ - \Delta t_{ik} b_{ik} w_i \quad (3.136)$$

Емкость БЗУ ограничена предельным объемом  $V_i^{\max}$ ,  $i = \overline{1, i^*}$  информации, который может в нем храниться. Пример на рис.2.9 учитывает соотношение  $w_i^+ \square w_i^-$  разницей в наклоне участков кривых, соответствующих записи и воспроизведению информации.

### 3.6.2 Модели переориентации бортовой съемочной аппаратуры

Модель изменения направления линии визирования описывается следующим уравнением [80]:

$$\theta_{ik+1} = \operatorname{arctg} \left\{ \frac{R_E \sin \varphi_{ik+1}}{r_{ik+1} - R_E \cos \varphi_{ik+1}} \right\} u_{ik} + \left( \theta_{ik} + \dot{\theta}_{ik} \Delta t_{ik} \right) (1 - u_{ik}), \quad i = \overline{1, i^*}, k = \overline{1, (k_i^* - 1)}, \quad (3.137)$$

где  $\Delta t_{ik} = t_{ik+1} - t_{ik}$ ;  $u_{ik}$  – параметр управления бортовой съемочной аппаратурой  $i$ -ого КА в момент  $t_{ik}$ ;  $\theta_{ik+1}, \theta_{ik}$  – углы визирования земных объектов бортовой съемочной аппаратурой  $i$ -ого КА в моменты  $t_{ik+1}$  и  $t_{ik}$  соответственно;  $R_E$  – радиус сферической Земли;  $r_{ik+1}$  – радиус-вектор  $i$ -ого КА в момент  $t_{ik+1}$ ;  $\varphi_{ik+1}$  – угловое расстояние от надира  $i$ -ого КА до земного объекта в момент  $t_{ik+1}$ ;

$\dot{\theta}_{ik}$  – скорость переориентации бортовой съемочной аппаратуры  $i$ -ого КА на временном интервале  $(t_{ik}, t_{ik+1})$ ; начальные условия:  $\theta_{i1} = \operatorname{arctg} \left\{ \frac{R \sin \varphi_{i1}}{r_{i1} - R \cos \varphi_{i1}} \right\} u_{i0}$ ,  $i = \overline{1, N}$ ,

угол ориентации бортовой съемочной аппаратуры КА считается нулевым до момента времени его первой съемки на интервале  $[0, T]$ .

Переориентация аппаратуры совершается равномерно, скорость переориентации представляет собой кусочно-постоянную функцию, участки которой определяются парами последовательных моментов съемки земных объектов:

$$\dot{\theta}_{ik} = \frac{\theta_{is} - \theta_{ir}}{t_{is} - t_{ir}}, \quad t_{ir} \leq t_{ik} < t_{ik+1} \leq t_{is}, \quad u_{ir-1} = u_{is-1} = 1, u_{ij} = 0, \forall j = \overline{r, s-2}, i = \overline{1, i^*}, k = \overline{1, k_i^*} \quad (3.138)$$

где  $t_{ir}, t_{is}$  – два последовательных момента времени, в которые совершается съемка земных объектов;  $\theta_{ir}, \theta_{is}$  – соответствующие съемкам углы визирования земных

объектов; начальные условия:  $\dot{\theta}_{ik} = 0, \dot{\theta}_{ir} = 0, u_{ik-1} = 0 \forall k = \overline{1, (r-1)}, u_{ir-1} = 1, i = \overline{1, i^*}$ , и

конечные условия  $\dot{\theta}_{ik} = 0, u_{ik-1} = 0 \forall k = \overline{(s+1), k_i}, u_{is-1} = 1, i = \overline{1, i^*}$ , – скорость переориентации бортовой съемочной аппаратуры КА считается нулевой до момента времени его первой съемки (включительно) на интервале  $[0, T]$  и во все моменты времени после последней съемки.

Модели (3.137) и (3.138) поясним на примере (рисунок 3.17). При совершении съемки земного объекта в момент  $t_{ik+1} : u_{ik+1} = 1$ , и аппаратура ориентирована на объект, второе слагаемое в (3.137) обращается в 0. Если съемки в момент  $t_{ik+1}$  не происходит, то  $u_{ik+1} = 0$ , первое слагаемое в (3.137) обращается в 0, а угол  $\theta_{ik+1}$  принимает промежуточное значение между значениями углов, соответствующих первому предшествующему  $t_{ir}$  и первому последующему  $t_{is}$  моментам, в которые совершаются съемки:

$$t_{ir} \leq t_{ik+1} \leq t_{is}, \theta_{ir} \leq \theta_{ik+1} \leq \theta_{is}, u_{ir} = u_{is} = 1; u_{ij} = 0, \forall j = \overline{r+1, s-1}.$$

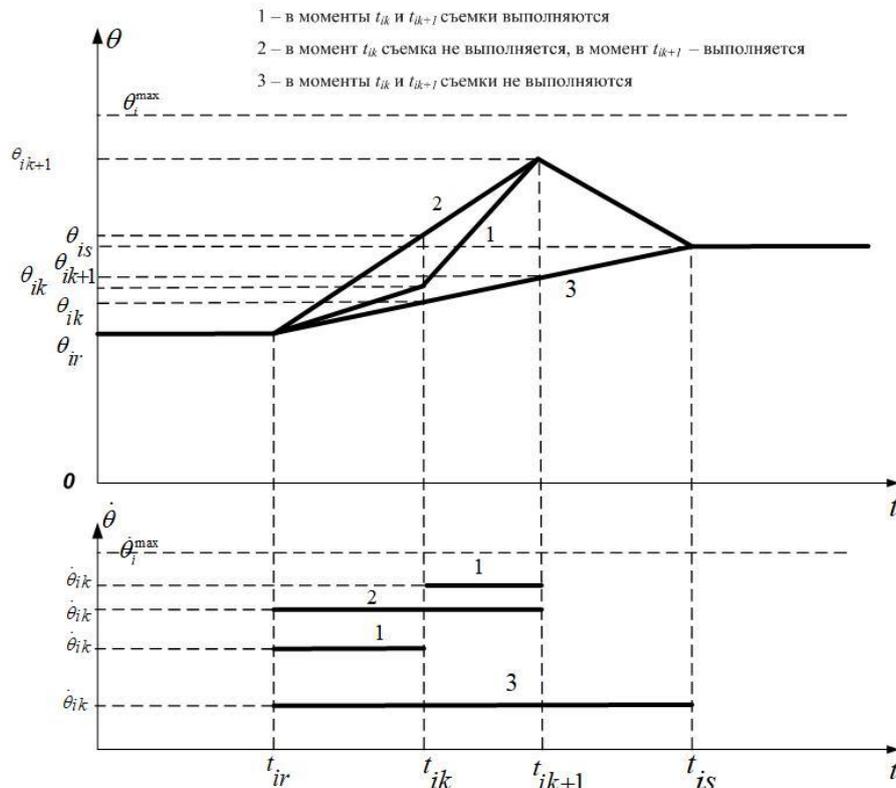


Рисунок 3.17 – Модель изменения направления линии визирования

Процесс переориентации бортовой съемочной аппаратуры КА характеризуется предельным углом  $\theta_{i \max}$ ,  $i = \overline{1, i^*}$  визирования земного объекта и предельной скоростью -  $\dot{\theta}_{i \max}$ ,  $i = \overline{1, i^*}$ .

### 3.7 Выводы по главе 3

Модель процесса обработки информации космическим сегментом представлена в виде функции генерации трафика, входом которой являются параметры заявки потребителя. Результатом применения модели является величина информации, которая после проведения сеанса связи попадает для дальнейшей обработки в НКПОР. В процессе вычислений определяются показатели эффективности – время и стоимость.

Для расчета времени и стоимости обслуживания заявки космическим сегментом сформированы:

- модель эволюции орбиты КА ДЗЗ;
- модель прогноза возможных интервалов коррекции КА для поддержания номинальных параметров орбит (стратегии коррекций);
- модель прогноза возможных интервалов времени циклов включения/выключения аппаратуры наблюдения
- модель прогноза возможных интервалов времени для сброса полученной информации на ППИ;

Модель эволюции орбит КА ДЗЗ включает учет нецентральности гравитационного поля, влияние полей Луны и Солнца, давления солнечного света и атмосферы.

Определено, что для орбит КА ОГ ДЗЗ требуется проведение коррекций, причиной которых являются: долгопериодические возмущения гринвичской долготы восходящего узла трасс, вековые возмущения эксцентриситета, аргумента перигея, наклона и абсолютной долготы восходящего узла. В качестве алгоритма управления долготой восходящего узла предложено использовать полученный автором алгоритм, основанный на применении достаточных условий

оптимальности. Новизной и отличием данного алгоритма от традиционных является одновременный учет систематических случайных и неслучайных аддитивных составляющих. Наличие в модели аддитивных неслучайных возмущений позволяет учесть дополнительные возмущения, которые отбрасываются при упрощении модели и ее линеаризации. Результаты получены с использованием достаточных условий оптимальности в виде линейной функции, коэффициенты которой определяются с помощью рекуррентных соотношений. Кроме того, полученные результаты были адаптированы автором для расчета области, в которых будут находиться параметры орбиты в установившемся режиме и длительности проведения коррекций.

Для модели съемки земных объектов сформированы:

- модель съемочного плана, включающую в себя: модели объектов съемки, модели для проверки выполнения условий съемки и модель временных последовательностей выполнения съемочных операций;
- модель съемки точечных объектов;
- модель съемки площадных объектов, сформированную на основе аппроксимации объекта съемки как в виде замкнутого полигона, так и в виде совокупности точечных объектов.

При аппроксимации объекта полиномом время начала и окончания съемки может быть вычислено аналитически. Однако, при неудачной форме объекта, соответствующие времена будут иметь большие погрешности, которые будут существенно ниже, если использовать аппроксимацию в виде совокупности точечных объектов. Но последний способ может быть реализован только с использованием численного моделирования движения КА с необходимостью подбора шага по времени.

Модель передачи целевой информации между КА и ППИ, в общем случае, служит для определения интервалов взаимной видимости ППИ→КА и КА→ППИ.

Совокупность моделей целевого функционирования аппаратуры бортового информационного комплекса КА составляют модель динамики состояния БЗУ и модели переориентации бортовой съемочной аппаратуры.

Предложена модель изменения памяти в БЗУ, согласно которой в процессе съемки занятый объем БЗУ увеличивается линейно по времени, в процессе сброса – уменьшается также линейно по времени. Скорость роста зависит от числа одновременно работающих камер, скорость сброса определяется производительностью передающей аппаратуры. Приращение занятого объема БЗУ за счет съемки одного объекта определяется суммарным объемом снимков одновременно задействованных камер.

При выполнении съемки земных объектов бортовая съемочная аппаратура КА изменяет свою ориентацию. Переориентация аппаратуры совершается равномерно, скорость переориентации представляет собой кусочно-постоянную функцию, участки которой определяются парами последовательных моментов съемки земных объектов.

В результате время, необходимое для проведения съемки по заявке определяется как совокупность суммарного времени проведения съемки, времени, необходимого для переориентации аппаратуры наблюдения и времени, необходимого для того, чтобы КА оказался в зоне взаимной радиовидимости с одним из ППИ, при условии, что:

- КА в это время не совершает корректирующие маневры;
- объема памяти БЗУ достаточно для сохранения снимка объекта съемки на протяжении всего интервала наблюдений.

#### **Глава 4. Математические модели КА и элементов НКПОР как составных частей информационной системы**

В предыдущих главах было предложено сформировать систему взаимосвязанных математических моделей КА и НКПОР как элементов единой информационной системы. В работе предложено каждый узел этой информационной системы рассматривать как некий обработчик информации. Для обработки информации в узле выполняется соответствующий процесс. В этом смысле математическая модель, будь то КА или элемента НКПОР, должна быть представлена как функция системного времени, преобразующая некоторый объем входящей информации в объем переработанной информации. Под эту модель подходит как КА, так и элемент НКПОР. Действительно, на вход космического сегмента поступает заявка, которая преобразуется в набор данных для проведения съемки и сброса информации на ППИ.

При моделировании и оптимизации целевого функционирования КС ДЗЗ будем считать, что список заявок-кандидатов на проведение мониторинга, или съёмки спутниками системы, составлен. Следующим этапом формирования плана является этап проведения баллистических расчетов, имеющих целью формирование следующих множеств:

- множества интервалов времени вывода КА на техобслуживание, связанное с необходимостью поддержания требуемой конфигурации орбиты;
- множества потенциально возможных интервалов времени проведения сеансов связи ППИ→КА;
- множества потенциально возможных интервалов времени проведения наблюдений заданного(ых) района;
- множества потенциально возможных интервалов времени проведения сеансов связи КА→ППИ;

Расчеты этого этапа начинаются с прогнозирования орбит каждого из спутников системы на интервале планирования. Прогнозирование осуществляется с использованием специализированной программы, использующей модели

движения описанные ранее. Исходными данными служат орбитальные данные спутников, известные на момент решения задачи планирования.

Процесс формирования множеств потенциально возможных съёмов наземных объектов и сеансов связи разбивается на несколько этапов.

Вначале рассчитывается так называемая кинематическая последовательность съёмов. Эта последовательность содержит список потенциально возможных моментов съёмов наземных объектов из списка, удовлетворяющих условию прямой видимости объекта со спутника при заданных поле зрения аппаратуры, и предельном угле отклонения оптической оси от надира.

На следующем этапе осуществляется «просеивание» кинематической последовательности съёмов с помощью исключения тех моментов съёмки, для которых не выполняется хотя бы одно из существующих так называемых статических ограничений, например, по разрешению снимка, освещенности объекта (территории) или неудовлетворительных условий метеонаблюдения.

Таким образом, после поступления  $j$ -й заявки с использованием математических моделей орбитальной группировки можно рассчитать «окна возможностей» съёмки с учетом ранее полученных  $k=1...j-1$  заявок и зарезервировать одно из них для обработки заявки космическим сегментом (рисунок 4.1). КА при этом выступает как элемент, который генерирует начальный трафик в системе.

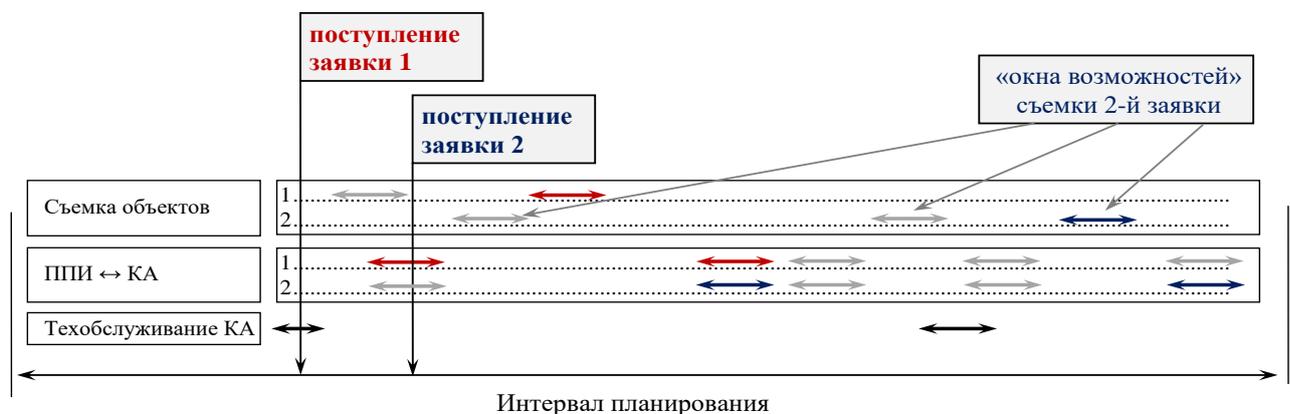


Рисунок 4.1 – Возможности съёмки по мере поступления заявок (космический сегмент)

Дальнейшая обработка заявки происходит в наземном сегменте в соответствии с выбранным сценарием. Сценарий представляет собой совокупность последовательных процессов, которые могут быть выполнены на разных ППИ (рисунок 4.2). Время обработки на ППИ зависит от его текущей загруженности и производительности. Соответственно время обработки и ее стоимость будут различаться.

Информация между узлами передается по линиям связи с известными пропускной способностью и стоимостью передачи информации.

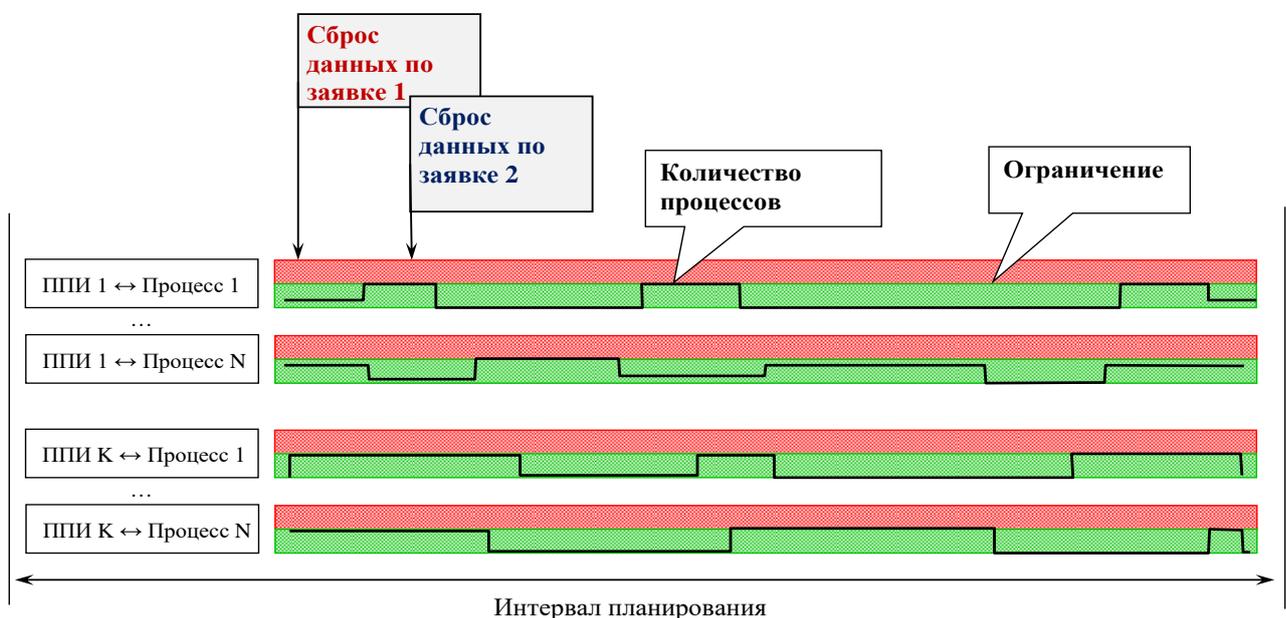


Рисунок 4.2 – Возможности обработки на ППИ по мере поступления заявок (космический сегмент)

Таким образом, формально каждый узел космической системы ДЗЗ может быть представлен, как функция преобразования объема входной информации в объем выходной информации инвариантно к ее тематическому содержанию (рисунок 4.3). При этом одновременно вычисляются:

- время, необходимое на выполнение процесса;
- условная стоимость обработки.

Ограничениями для каждого узла являются:

- максимальное количество одновременно выполняющихся однотипных процессов;
- ограничения на максимальный общий объем памяти.

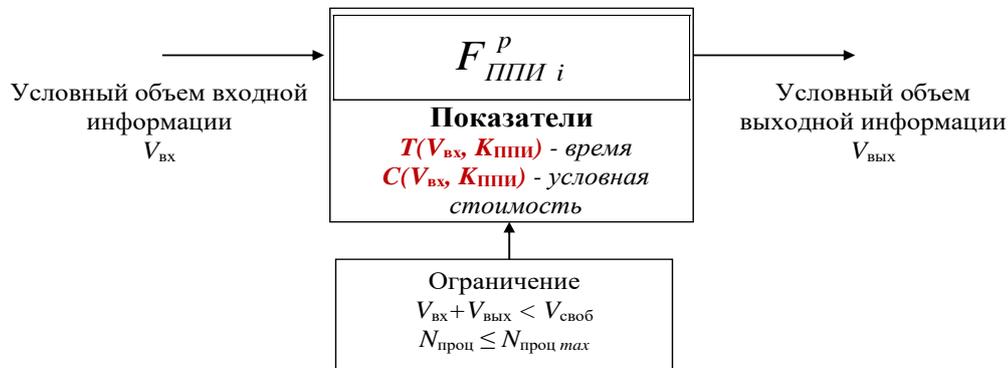


Рисунок 4.3 – Обобщенное представление узла космической системы ДЗЗ

Одной из важнейших характеристик нашей системы, влияющих на ее эффективность является стоимость. Учитывая, что для решения поставленной задачи необходимы модели стоимости, включающие наиболее существенные составляющие, к упрощенной оценке стоимости может быть предложен следующий подход.

Затраты на космическую систему ДЗЗ складываются из затрат на

- космические аппараты,
- наземный комплекс приема, обработки и распространения информации
- комплекс передачи информации и др.

При решении задачи будем полагать, что в системе используются типовые КА, НКПОР и линии связи. В такой постановке остается рассмотреть затраты на обслуживание непосредственно самой заявки.

Для оценки затрат на обслуживание воспользуемся следующим подходом. Будем полагать, что для обслуживания заявки будут арендоваться средства наземного комплекса управления и системы приема и обработки информации.

Далее представлены формальное описание узлов ЕТРИС ДЗЗ и уточненные математические модели, составляющих ее космический и наземный сегменты.

#### **4.1 Модель расчета показателей эффективности космического аппарата как узла информационной системы**

Для решения задачи оптимизации распределения потоков целевой информации описание КА включает:

- описание КА, включающее полное описание, идентификатор и служебную информацию;
- параметры орбиты на момент начала планирования;
- перечень и параметры имеющейся съемочной аппаратуры, к основным из которых относятся: поле зрения и предельный угол поворота линии визирования по каждому типу аппаратуры наблюдения;
- условия радиовидимости ППИ→КА и КА←ППИ в виде углов  $\delta^*$  и  $\xi$ , рассчитываемых в соответствии с методикой, изложенной в п. 3.5.1.

##### **4.1.1 Расчет объема выходной информации**

Для оценки объема сбрасываемой на ППИ информации (начального трафика) будем считать, что для каждого типа аппаратуры наблюдения имеется прямая связь между общей площадью района съемки, заданного в заявке, и объемом информации, передаваемым с каждого конкретного КА на ППИ (рисунок 4.4).

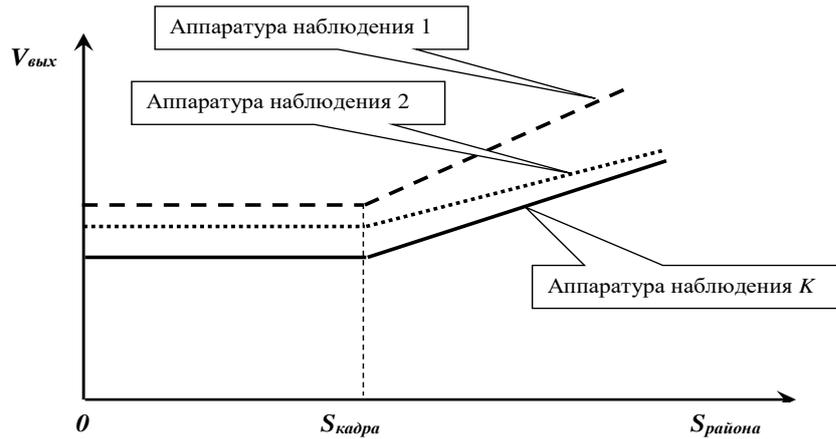


Рисунок 4.4 – Связь между общей площадью района съемки и объемом информации

При съемке по заявке точечных объектов формируется фиксированный объем трафика. При увеличении площади объем генерируемой информации возрастает прямо пропорционально с известным коэффициентом:

$$F_{KAj}^p : V_{\text{вых}} = \begin{cases} const & S_{\text{района}} < S_{\text{кадра}} \\ K_{KAj} \cdot S_{\text{района}} & S_{\text{района}} \geq S_{\text{кадра}} \end{cases} \quad (4.1)$$

Возможно более упрощенное представление уравнения (4.1) в виде таблицы 4.1, где объем выходной информации в зависимости от площади рассчитывается заранее по методике, приведенной в главе 3.

Таблица 4.1 – Табличное формирование функций генерации трафика  $F_{KA}$

КА	Аппаратура наблюдения	Площадь наблюдения, км <sup>2</sup>			
		$S_1$	$S_2$	...	$S_k$
«Ресурс-П» №1	Геотон				
	ШМСА-ВР				
	ШМСА-СР				
	ГСА				
«Ресурс-П» №2	Геотон				
	ШМСА-ВР				
	ШМСА-СР				
	ГСА				
....	....	....	....	....	....

#### 4.1.2 Расчет времени выполнения процесса

Процесс в данном узле начинается с момента времени поступления заявки  $t_0$  (см. п. 1.3.9) и до момента момент окончания передачи данных на ППИ. Он включает в себя

- расчет времени  $t_{пц2}$  передачи команды на борт КА с помощью модели передачи целевой информации между КА и ППИ (п.п. 3.1, 3.2, 3.5);
- расчет интервалов времени для съемки и ее времени ее окончания  $t_{смк2}$  с помощью модели съемки земных объектов (п. 3.1, 3.2, 3.4)
- расчет времени  $t_{нд2}$  передачи данных с КА на ППИ с помощью модели передачи целевой информации между КА и ППИ (п.п. 3.1, 3.2, 3.5);

Учет ограничений на максимальный объем оперативной памяти производится с помощью модели целевой аппаратуры бортового информационного комплекса КА.

Учет запрета на интервалы времени, когда выполнение процесса на КА невозможно, связанные с техническим обслуживанием, определяется с помощью моделей описанных в п.п. 3.1 и 3.2.

Максимально возможное одновременно выполняющихся процессов принимается равным 1.

#### 4.1.3 Упрощенная модель расчета стоимости

Для оценки затрат на обслуживание единичной заявки со стороны орбитального комплекса будем считать, что стоимость обслуживания одного КА в единицу времени  $C_{уд}$  зависит от сложности КА –  $Q_{ка}$  [52] и затрат на оплату труда операторов смены. Тогда для стоимости обслуживания заявки  $C_{iqКА}$  (см. п.1.3.9) одним КА ОГ ДЗЗ будем иметь:

$$C_{jq\text{ КА}} = (C_{уд}(Q_{ка}) + C_{оп} \cdot N_{оп}) \cdot (t_{пц2} - t_0), \quad (4.2)$$

где  $C_{оп}$  – стоимость человека/час в конкретном ППИ,  $N_{оп}$  – число операторов в смене.

Параметр  $C_{уд}(Q_{ка})$ , входящий в эмпирическую формулу (4.2) существенно зависит от уровня развития техники и нуждается в периодическом уточнении на основании обработки статистических данных по различным КА.

Также, возможно более упрощенное представление уравнения (4.2) в виде таблицы 4.2.

Таблица 4.2 – Табличное формирование функций стоимости обслуживания заявки  $C_{iqКА}$

КА	Аппаратура наблюдения	Площадь наблюдения, км <sup>2</sup>			
		$S_1$	$S_2$	...	$S_k$
«Ресурс-П» №1	Геотон				
	ШМСА-ВР				
	ШМСА-СР				
	ГСА				
«Ресурс-П» №2	Геотон				
	ШМСА-ВР				
	ШМСА-СР				
	ГСА				
....	....	....	....	....	....

#### 4.1.4 О подходах к расчету отснятой площади

Территория Земли  $\Phi_{\Xi}$ , подлежащая съемке на интервале планирования, представляет собой объединение пространственно разнесенных обособленных полигональных образов  $\Phi_n$  всех объектов, входящих в  $\Xi_T$ :

$$\Phi_{\Xi} = \bigcup_{n=1}^N \Phi_n, \quad n = 1, 2, \dots, N \quad (4.3)$$

Пусть  $\Omega_{ij}$  – часть земной поверхности, покрытая полосой захвата  $i$ -го КА на  $j$ -ом витке,  $\Phi_{ij}$  – часть  $\Phi_{\Xi}$ , отснятая  $i$ -м КА на  $j$ -ом витке,  $\Phi_i$  – часть  $\Phi_{\Xi}$ , отснятая  $i$ -м КА за  $j_i^*$  витков, уложившихся на интервале планирования, а  $\Phi_{ог}$  – часть  $\Phi_{\Xi}$ , отснятая орбитальной группировкой на интервале планирования, тогда

$$\begin{aligned}
\Phi_{ij} &= \Phi_{\Xi} \cap \Omega_{ij}, \\
\Phi_i &= \bigcup_{j=1}^{j_i^*} \Phi_{ij}, \\
\Phi_{OG} &= \bigcup_{i=1}^{i^*} \Phi_i
\end{aligned} \tag{4.4}$$

Для вычисления искомой площади  $S(\Phi_{OG})$  необходимо последовательно выполнять операции пересечения и объединения множеств. Можно предложить три подхода к расчету  $S(\Phi_{OG})$ .

Идея первого подхода состоит в использовании метода статистического моделирования. В цикле по номеру испытания с помощью датчика случайных чисел (ДСЧ) разыгрывается положение точки, равномерно распределенной внутри полигонального образа объекта съемки. Подсчитывается общее число испытаний  $N$  и число «благополучных» исходов  $n$ , когда точка с координатами  $(\lambda, \varphi)$ , принадлежащая полигону объекта, принадлежит и полосе захвата. По окончании цикла отснятая площадь полигона вычисляется по формуле  $S(\Phi_{ij}) = \frac{n}{N}$ . Применимость такого подхода для районов наблюдения, заданных долготными и широтными границами, показана, например, в [52, 53].

Идея второго подхода состоит в замене каждого площадного объекта совокупностью точечных с площадью, равной площади кадра  $s_{kad}$ . Исходная нумерация объектов трансформируется в новую нумерацию, в которой  $N^*$  – максимальный номер совокупности только точечных объектов. Определив номера  $n_{ij}$ ,  $n \in [1, 2, \dots, N^*]$  и число точечных объектов  $k_{ij}$ , попавших в полосу захвата  $i$ -го КА на  $j$ -ом витке, площадь  $S(\Phi_{ij})$  можно найти по формуле

$$S(\Phi_{ij}) = k_{ij} s_{kad} \tag{4.5}$$

площадь  $S(\Phi_i)$  – по формуле

$$S(\Phi_i) = \sum_j^{j_i^*} k_{ij} s_{kad}, \quad n_{ij} \neq n_{ij+1}, \quad n \in [1, 2, \dots, N^*] \tag{4.6}$$

и площадь  $S(\Phi_{OG})$  – по формуле

$$S(\Phi_{ог}) = \sum_i^{i^*} S(\Phi_i) = \sum_i^{i^*} \sum_j^{j_i^*} k_{ij} s_{кад}, \quad n_{ij} \neq n_{ij+1}, \quad n_{ij} \neq n_{i+1j}, \quad n \in [1, 2, \dots, N^*] \quad (4.7)$$

При реализации этого подхода предлагается применить замену векторного представления полигональных объектов растровым: геометрические образы объектов произвольной формы на фоне земной поверхности преобразуются в двуцветный (или чернобелый) растр, т.е. набор пикселей, цвет которых отражает принадлежность либо какому-то объекту, либо фону. С учетом масштабных коэффициентов каждый пиксел растра есть точечный объект определенной площади. Факт принадлежности конкретного пикселя, имеющего определенные координаты в кадре, проверяется путем сравнения этих координат с границами текущей зоны захвата КА.

Идея третьего подхода состоит в разделении площадных объектов на совокупности смежных протяженных фрагментов шириною, равной ширине полосы захвата, границы которых эквидистантны трассе КА, и использовании технологий геоинформационных систем. Вышеописанные пространственные модели объектов съемки и зон захвата представляют собой полигоны. Данный подход к расчету отснятой площади основывается на том, что оверлеи (наложения) полигонов изоморфны операциям теории множеств [18].

В геоинформационных системах для реализации набора множественных операций с пространственными объектами разработаны оверлейные алгоритмы наложения типовых примитивов: точек, линий, полилиний и полигонов.

Рассмотрим более детально третий подход. Основу сложных оверлейных алгоритмов, используемых для анализа пространственных отношений полигонов, составляет алгоритм определения пересечения линий.

### ***Алгоритм определения пересечения линий***

Основной вопрос, который решает этот алгоритм: пересекается ли линия, соединяющая точки  $(x_1, y_1)$  и  $(x_2, y_2)$  одной оцифрованной кривой, с линией, соединяющей точки  $(u_1, v_1)$  и  $(u_2, v_2)$  другой кривой, и если да, то где [18]. Пусть уравнение первого отрезка записано в параметрическом виде:

$$\begin{aligned}x &= x_1 + (x_2 - x_1)t \\y &= y_1 + (y_2 - y_1)t,\end{aligned}\tag{4.8}$$

где  $t$  — параметр ( $0 \leq t \leq 1$ ); начальная точка  $(x_1, y_1)$  отрезка соответствует  $t=0$ , конечная точка  $(x_2, y_2)$  —  $t = 1$ . Предполагается, что хотя бы одна из разностей  $(x_2 - x_1)$  и  $(y_2 - y_1)$  отлична от 0. Аналогично записывается уравнение отрезка второй линии:

$$\begin{aligned}x &= u_1 + (u_2 - u_1)\tau \\y &= v_1 + (v_2 - v_1)\tau,\end{aligned}\tag{4.9}$$

где  $\tau$  — параметр ( $0 \leq \tau \leq 1$ ).

Точка пересечения (если она есть и находится в пределах отрезков) определяется системой:

$$\begin{aligned}(x_2 - x_1)t - (u_2 - u_1)\tau &= u_1 - x_1, \\(y_2 - y_1)t - (v_2 - v_1)\tau &= v_1 - y_1, \\0 \leq t \leq 1, \quad 0 \leq \tau \leq 1.\end{aligned}\tag{4.10}$$

Для нахождения решения системы уравнений необходимо определить значения трех определителей

главного:

$$\Delta = (u_2 - u_1)(y_2 - y_1) - (x_2 - x_1)(v_2 - v_1)\tag{4.11}$$

и двух частных:

$$\begin{aligned}\Delta^{(1)} &= (u_2 - u_1)(v_2 - v_1) - (u_1 - x_1)(v_2 - v_1), \\ \Delta^{(2)} &= (x_2 - x_1)(v_1 - y_1) - (u_1 - x_1)(y_2 - y_1).\end{aligned}\tag{4.12}$$

Возможны следующие случаи:

1. Если  $\Delta \neq 0$ , то существует единственная искомая точка пересечения отрезков, определяемая известным правилом Крамера:

$$t = \Delta^{(1)} / \Delta, \quad \tau = \Delta^{(2)} / \Delta\tag{4.13}$$

и условиями  $0 \leq t \leq 1$  и  $0 \leq \tau \leq 1$ .

2. Если  $\Delta = 0$ , то тогда должны быть  $\Delta^{(1)} = 0$  и  $\Delta^{(2)} = 0$ . В этом случае отрезки будут частично или полностью совпадать. При этом возможны четыре варианта их взаимного расположения, которые следует рассмотреть для построения топологических связей объектов (например, смежность, совпадение) и определения координат узлов.

### ***Способы определения пересечения полилиний***

Пусть имеются две полилинии с  $n_1$  и  $n_2$  сегментами соответственно. Самым простым способом нахождения их точек пересечения является последовательная проверка пересечения каждого сегмента первой линии с каждым сегментом второй линии. Вычислительная сложность этого алгоритма, пропорциональная произведению  $n_1 * n_2$ , может быть уменьшена при помощи разнообразных эвристических алгоритмов [18].

В частности, сложность алгоритма вычисления пересечения полилиний может быть снижена, если предварительно проверять на пересечение минимальные ограничивающие прямоугольники полилиний. Эти прямоугольники определяются минимальными и максимальными координатами  $x$  и  $y$ . Две полилинии не пересекаются, если не пересекаются их ограничивающие прямоугольники. Можно применить этот подход и для определения пересечения отдельных сегментов полилиний. Два отрезка  $AB$  и  $CD$  не пересекаются, если не пересекаются интервалы  $(x_A, x_B)$  и  $(x_C, x_D)$  или не пересекаются интервалы  $(y_A, y_B)$  и  $(y_C, y_D)$ .

Применительно к задаче покрытия площадного объекта полосой захвата необходимо определить точки пересечения правой  $(B,C)$  и левой  $(A,D)$  границ полосы захвата  $i$ -го КА на  $j$ -ом витке с участками полилиний, входящих в контур полигона и лежащих в пределах ограничивающего прямоугольника от  $\lambda_{\min}$  до  $\lambda_{\max}$  по долготе и от  $\varphi_{\min}$  до  $\varphi_{\max}$  по широте (рисунок 4.5).

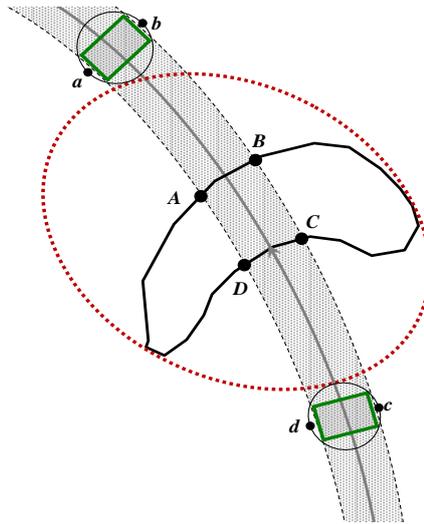


Рисунок 4.5 – К определению площади покрытия

На рисунке 3.5 координаты точек  $d$  и  $c$  соответствуют расчетному моменту начала съемки  $t_{ik}$ , а координаты точек  $a$  и  $b$  – расчетному моменту окончания съемки  $t_{ik+1}$ . Ясно, что координаты точек границ однозначно определяются координатами точек трассы  $(\lambda(t_{ik}), \varphi(t_{ik}))$  или  $(\lambda(t_{ik+1}), \varphi(t_{ik+1}))$ , углом переориентации оси визирования  $\theta_{ik}$ , текущим азимутом вектора скорости КА  $A(t_{ik})$  или  $A(t_{ik+1})$  и заданным поперечным линейным размером полосы захвата  $l_x$  (см. п. 4.1.3). Ограничивающий прямоугольник определяется из соотношений

$$\begin{aligned} \lambda_{\min} &= \min(\lambda_a, \lambda_b, \lambda_c, \lambda_d), & \lambda_{\max} &= \max(\lambda_a, \lambda_b, \lambda_c, \lambda_d), \\ \varphi_{\min} &= \min(\varphi_a, \varphi_b, \varphi_c, \varphi_d), & \varphi_{\max} &= \max(\varphi_a, \varphi_b, \varphi_c, \varphi_d) \end{aligned} \quad (4.14)$$

Используя пределы, найденные по (4.14), число сегментов контура объекта, участвующих в поиске координат точек  $A$ ,  $B$ ,  $C$  и  $D$ , можно существенно уменьшить. Тем не менее, вычисление координат точек  $A$ ,  $B$ ,  $C$  и  $D$  выполняется многократным повторением расчета по формулам (4.11) – (4.13). Результатом расчета являются координаты  $(\lambda_A, \varphi_A)$ ,  $(\lambda_B, \varphi_B)$ ,  $(\lambda_C, \varphi_C)$  и  $(\lambda_D, \varphi_D)$ , которые определяют вершины полигона  $ABCD$ , заключенного между контуром объекта и полосой захвата.

Другой метод основан на разбиении полилинии на секции, в которых линия монотонно возрастает или убывает по  $x$  и по  $y$  [18]. Разбиение происходит в точках

локального минимума или максимума по  $x$  или по  $y$ . Горизонтальная или вертикальная линия пересекает такую секцию только в одной точке. Это дает возможность уменьшить трудоемкость алгоритма поиска пересечения полилиний. Если для двух секций найдена точка пересечения, не нужно проверять оставшиеся пары точек, т.к. это пересечение единственное при условии, что вторые производные в секциях не меняют знак.

Из приведенного описания следует, что метод также основан на использовании формул (4.11) – (4.13).

#### 4.1.1.2. Методика расчета площади полигона, покрытой полосой съемки

Пусть  $(\lambda_A, \varphi_A)$ ,  $(\lambda_B, \varphi_B)$ ,  $(\lambda_C, \varphi_C)$  и  $(\lambda_D, \varphi_D)$  – найденные координаты угловых вершин полигона  $\Phi_{ij}$ , являющегося пересечением полигона объекта и полосы съемки. Его площадь  $s_n(\Phi_{ij})$  равна площади  $n$ -го объекта, отснятой  $i$ -м КА на  $j$ -ом витке. Контур  $\Phi_{ij}$  включает все вершины контура объекта, лежащие между вершинами  $A, B$  и  $C, D$  (рисунок 4.5), а также все вершины границ полосы съемки, лежащие между вершинами  $A, D$  и  $B, C$ . Для выделения номеров вершин из последовательности номеров контура объекта можно использовать соотношения

$$\begin{aligned} \lambda_A \leq \lambda_i \leq \lambda_B, \quad \varphi_i > \varphi_c, \quad i = i_L, i_L + 1, \dots, i_R, \\ \lambda_D \leq \lambda_i \leq \lambda_C, \quad \varphi_i < \varphi_c, \quad i = i_L, i_L + 1, \dots, i_R, \end{aligned} \quad (4.15)$$

где  $\varphi_c = \frac{\varphi(t_{ik}) + \varphi(t_{ik+1})}{2}$  – средняя широта съемочного участка трассы,

$i_L, i_R$  ( $i_L < i_R$ ) – номера вершин сегментов контура, на которых найдены точки пересечения  $A, B$  и  $C, D$ .

Для выделения номеров вершин из последовательности номеров левой и правой границ полосы съемки можно использовать соотношения

$$\begin{aligned} \varphi_D \leq \varphi_i \leq \varphi_A, \quad \lambda_i < \lambda_c, \quad i = i_L, i_L + 1, \dots, i_R, \\ \varphi_C \leq \varphi_i \leq \varphi_B, \quad \lambda_i > \lambda_c, \quad i = i_L, i_L + 1, \dots, i_R, \end{aligned} \quad (4.16)$$

где  $\lambda_c = \frac{\lambda(t_{ik}) + \lambda(t_{ik+1})}{2}$  – средняя долгота съемочного участка трассы,

$i_L, i_R$  – номера вершин сегментов границ, на которых найдены точки пересечения  $A, B$  и  $C, D$ . Выделенные вершины контура  $\Phi_{ij}$  необходимо заново перенумеровать (по часовой стрелке) и применить формулы для вычисления отснятой площади  $s_n(\Phi_{ij})$ . Доля отснятой площади  $n$ -го объекта оценивается по формуле

$$\bar{s}_n(\Phi_{ij}) = \frac{s_n(\Phi_{ij})}{S_n} \quad (4.17)$$

где  $S_n$  – полная площадь  $n$ -го объекта. Кроме того, вычисляется величина  $\bar{s}_{n_{ik}}$  отснятого фрагмента площадного объекта, отнесенная к площади кадра:

$$\bar{s}_{n_{ik}} = \frac{s_n(\Phi_{ij})}{s_{\text{кадр}}} = \frac{s_n(\Phi_{ij})}{l_x \cdot l_y} \quad (4.18)$$

#### 4.1.5 Модель расчета суммарной площади

При расчете величины покрытия заданной территории Земли заданной полосой обзора целевой аппаратуры КА в заданном интервале времени для ОГ заданного состава считается, что множество  $\Xi_T$  объектов, подлежащих съемке на интервале планирования, полностью сформировано и разбито на непересекающиеся подмножества  $\Xi_q$  объектов, требующих съемки одной и той же аппаратурой:

$$\Xi_T = \bigcup_q \Xi_q, \quad \Xi_{q'} \cap \Xi_{q''} = \emptyset \quad \forall q' \neq q'' .$$

Другими словами, любой объект из множества  $\Xi_q$  может быть снят целевой аппаратурой однотипных по целевой аппаратуре КА.

Каждому объекту в множестве  $\Xi_q$ , присвоен номер  $n, n=1, \dots, N$  и ставится в соответствие структура данных, состоящая из массива координат 4-х точек пересечения полосы съемки с контуром, ограничивающим полигональный объект (угловых вершин), номера  $i$  КА, сделавшего снимок, номера витка  $j$ , на котором сделан снимок, и булевой переменной  $\zeta$ , фиксирующей факт съемки участка полигона, покрытого полосой съемки.

Низкоорбитальные однотипные КА группировки имеют (в номинале) кратные солнечно-синхронные орбиты и характеризуются периодом кратности орбит  $T^*$ . Для кратной  $N$ -суточной ССО число витков  $j^*$ , целиком укладывающееся в  $T^* = N$  суток, однозначно определяется периодом обращения  $T_{op}$ :

$$j^* = \frac{T_{cc}}{T_{op}} N = \left[ \frac{T_{cc}}{T_{op}} \right] N + m = n_{nc} N + m \quad (4.19)$$

где  $T_{cc}$  – длительность средних солнечных суток,  $n_{nc}$  – число полных витков в полетных сутках, ( $n_{nc}$  – класс орбиты,  $m$  – индекс орбиты),  $n_{nc}$ ,  $N$ ,  $m$  – целые числа. Смещение трассы  $\Delta\lambda$  за 1 виток КА (межвитковый сдвиг) также пропорционально  $T_{op}$ :

$$\Delta\lambda = 2\pi \frac{T_{op}}{T_{cc}} = T_{op} \omega_E \quad (4.20)$$

или в линейном выражении

$$L_{m\theta} = R_E \Delta\lambda \quad (4.21)$$

Внутри периода кратности  $T^*$  трассы  $i$ -го КА не повторяются, а ширина полосы захвата (полосы съемки)  $l_x^{(i)}$  существенно меньше ширины полосы обзора по экватору  $b_s^{(i)}$ . Поэтому, если интервал планирования  $T \leq T^*$ , то площадь  $S_i$ , отснятая  $i$ -м КА на интервале планирования, т.е. за  $j^*$  витков, складывается из площадей точечных объектов и отдельных фрагментов разных площадных объектов, отснятых на каждом  $j$ -ом витке из  $j^*$  возможных

$$S_i = \sum_{j=1}^{j^*} \sum_{n=1}^N s_n(\Phi_{ij}) \quad (4.22)$$

Площадь  $S_q$ , отснятая аппаратурой  $q$ -го типа на интервале планирования, оценивается по формуле

$$S_q = \sum_{i=1}^{i^*} S_i = \sum_{i=1}^{i^*} \sum_{j=1}^{j^*} \sum_{n=1}^N s_n(\Phi_{ij}), \quad (4.23)$$

где учитываются только те слагаемые  $s_n(\Phi_{ij})$ , для которых контуры  $\Phi_{ij}$  разные (т.е. разные угловые вершины). Поскольку площади, отснятые аппаратурой разного

типа, существенно отличаются по пространственному разрешению, спектральным диапазонам и точности пространственной привязки, постольку для оценки производительности съемки, выполненной группировкой КА на интервале планирования, предлагается использовать не аддитивный показатель в виде суммы  $\sum_{q=1}^{q^*} S_q$ , а вектор-строку  $(S_1, S_2, \dots, S_{q^*})^T$ , где  $q^*$  – число типов бортовой съемочной аппаратуры, используемой группировкой.

#### 4.2 Модель расчета показателей эффективности наземных пунктов

Пункты приема информации представляют собой совокупность аппаратно-программных комплексов и персонала, включающую в базовом варианте антенную и приемно-регистрирующую подсистемы, рабочие станции управления с соответствующим ПО и штат операторов. Основные ППИ системы укомплектованы наземными приемными комплексами.

Наземные приемные комплексы (НПК) обеспечивают прием и демодуляцию информации с КА системы, привязку информации к наземному времени, кадровую синхронизацию, оперативный просмотр принимаемой информации и ее регистрацию в темпе поступления.

В зависимости от комплектации аппаратного и программного обеспечения и уровня профессиональной подготовки операторов возможности ППИ могут существенно различаться.

Обобщая результаты проведенного в главах 1 и 2 системного анализа распределения процессов обработки для решения задачи оптимизации распределения потоков целевой информации описание наземного пункта включает:

- описание наземного пункта, включающее полное описание, идентификатор и служебную информацию;
- перечень и характеристики приемно-передающей аппаратуры;
- характеристики политики распределения ресурсов.

В свою очередь, характеристики приемно-передающей аппаратуры включают в себя:

- условия радиовидимости ППИ→КА в виде углов  $\delta^*$ , рассчитываемых в соответствии с методикой, изложенной в п. 3.5.1;
- перечень обслуживаемых КА.

Характеристики политики распределения ресурсов представляют собой совокупность:

- коэффициентов производительности и себестоимости выполнения процесса на каждом из ППИ;
- возможность обработки с помощью того или иного процесса на наземном пункте
- ограничений на количество одновременно запущенных однотипных процессов на каждом наземном пункте;
- ограничений на максимально допустимый объем информации по однотипным процессам на каждом наземном пункте.

#### **4.2.1 Расчет объема выходной информации**

Объем выходной информации зависит от объема входной информации и, собственно, типа процесса обработки. Например, классический сценарий обработки включает в себя первичную обработку, каталогизацию и стандартную обработку. Все эти этапы существенно различаются как по времени, так и по привлечению операторов. Поэтому использование какой-либо одной формулы для расчетов объективно невозможно. Тем не менее, если учесть тот факт, что в наземном пункте происходит формирование новых тематических результатов к уже имеющемуся «сырому» снимку, которые могут быть:

- набором графических файлов
- тематическими результатами обработки в виде полигонов, линий графиков
- тематическими признаками типа «да» или «нет» и т.п.

То можно сказать что на выходе может происходить:

- неизменность объема информации;

- добавление информации;
- кратное увеличение информации;
- кратное уменьшение информации;
- уменьшение информации практически до существенно меньших объемов.

При формировании исходных данных для применения результатов данной работы необходимо привлечение соответствующих специалистов для конкретизации расчетных формул.

Возможно более упрощенное представление расчета объема выходной информации в виде таблицы 4.3.

Таблица 4.3 – Табличное формирование функций генерации трафика  $F$  для наземной обработки

Название процесса	Объем входной информации				Объем выходной информации
	$V_1$	$V_1$	...	$V_1$	
Процесс 1					
Процесс 2					
...	...	...	...	...	...

#### 4.2.2 Расчет времени выполнения процесса

Наличие ограничений приводит к тому, что после выполнения процесса в узле определяется время ожидания до момента освобождения ресурсов в следующем узле. В этом случае общее время выполнения процесса рассчитывается по формуле:

$$T_{\text{проц } i} = K_{\text{ппи}} \cdot T_{\text{эталон.проц } i}(V_{\text{вх}}) + T_{\text{ожидания}}, \quad (4.24)$$

где  $T_{\text{ожидания}}$  – время ожидания до момента освобождения ресурсов в следующем узле, когда для каждого момента времени выполнения процесса выполняются условия (4.25):

- наземный пункт работает в течении всего времени выполнения процесса, к таким ограничениям относятся прежде всего возможные перерывы в выходные и праздничные дни, перерывы на плановое и внеплановое техническое обслуживание и др.;
- количество одновременно запущенных однотипных процессов на каждом наземном пункте строго меньше заданного;

- объем входной и выходной информации не превышает уровня объема свободной памяти.

$$\begin{aligned} V_{\text{вх}} + V_{\text{вых}} &< V_{\text{своб}} \\ N_{\text{проц}} &\leq N_{\text{проц max}} \end{aligned} \quad (4.25)$$

$T_{\text{эталон.проц } i}$  – эталонное время выполнения процесса в эталонном наземном пункте, зависящее от объема входной информации;

$K_{\text{ппи}}$  – коэффициент производительности наземного пункта, в котором выполняется процесс обработки данных. В случае, если обработка процесса в данном узле невозможна, то он равен 0. Для эталонного узла  $K_{\text{ппи}} = 1$ .

При формировании исходных данных для применения результатов данной работы необходимо привлечение соответствующих специалистов для конкретизации формулы (4.24) в части формирования способа вычисления эталонного времени выполнения процесса и коэффициента производительности конкретного наземного пункта.

Возможно более упрощенное представление расчета времени в виде таблицы 4.4.

Таблица 4.4 – Табличное формирование данных по времени выполнения процессов на наземном пункте

Название процесса	Объем входной информации				Время выполнения
	$V_1$	$V_1$	...	$V_1$	
Процесс 1					
Процесс 2					
...	...	...	...	...	...

### 4.2.3 Упрощенная модель расчета стоимости

Для оценки затрат на обслуживание процесса при обработке единичной заявки со стороны наземного пункта будем считать, что стоимость обслуживания процесса в единицу времени  $C_{\text{проц.уд}}$  зависит от его сложности –  $Q_{\text{проц}}$  и затрат на оплату труда задействованных операторов. Тогда для стоимости обслуживания заявки  $C_{i\text{проц}}$  (см. п1.3.9) одним ППИ будем иметь:

$$C_{jq \text{ проц}} = (C_{\text{проц,уд}}(Q_{\text{проц}}) + C_{\text{оп}} \cdot N_{\text{оп}}) \cdot C_{\text{ппи}} \cdot T_{\text{эталон.проц } i}, \quad (4.26)$$

где  $C_{\text{оп}}$  – стоимость человека/час в конкретном наземном пункте,  $N_{\text{оп}}$  – число операторов, задействованных в процессе обработки.

$C_{\text{ппи}}$  – коэффициент себестоимости наземного пункта, в котором выполняется процесс обработки данных. Для эталонного узла  $C_{\text{ппи}} = 1$ .

Возможно более упрощенное представление расчета стоимости в виде таблицы 4.5.

Таблица 4.5 – Табличное формирование данных по стоимости выполнения процессов на наземном пункте

Название процесса	Объем входной информации				Стоимость обработки
	$V_1$	$V_1$	...	$V_1$	
Процесс 1					
Процесс 2					
...	...	...	...	...	...

### 4.3 Модель расчета показателей эффективности при передаче информации

#### 4.3.1 Расчет времени выполнения передачи информации

Обмен информацией между центрами НКИ реализуется с использованием сети передачи данных, использующей выделенные каналы разной пропускной способности (см. п. 1.2.2).

Имеют место регулярные отказы: регулярно происходит перезапуск системы, в связи с чем процесс передачи данных с КА ДЗЗ прерывается и начинается передача данных, принятых за сеанс приема, заново в полном объеме.

При формировании модели передачи информации считается, что

- скоростные свойства системы передачи данных характеризует вектор  $Y$ , у которого координата  $y_n$  ( $n = 1, 2, \dots, n^*$ ) представляет пропускную способность  $n$ -го канала связи,
- надежность наземной системы передачи данных характеризует вектор  $P$ , у которого координата  $p_n$  ( $n = 1, 2, \dots, n^*$ ) представляет вероятность безотказной работы  $n$ -го канала связи,

- накопление целевой информации в виде отснятых маршрутов и продуктов их обработки разных уровней, характеризуется вектором  $X$ , у которого координата  $x_r$  ( $r = 1, 2, \dots, r^*$ ) представляет текущий занятый объем долговременного хранилища  $r$ -го ППИ.

Пропускная способность каналов связи сводится в таблицу вида 4.6, в ячейках которой указывается либо пропускная способность канала связи (объем/сутки), либо 0, если прямой канал связи отсутствует.

Таблица 4.6 – Пропускная способность каналов передачи данных

	$КА_1$	...	$КА_N$	$ППИ_1$	...	$ППИ_M$
$КА_1$	$v_{11}$					
...						
$КА_N$						
$ППИ_1$						
...		$v_{ij}$				
$ППИ_M$						

Тогда время, необходимое для передачи некоторого информации  $V$  между узлами можно определить по формуле:

$$T_{\text{передачи } ij} = v_{ij} \cdot V, \quad (4.27)$$

#### 4.1.2 Упрощенная модель расчета стоимости

Передача информации может осуществляться как по внутренним, так и по арендуемым каналам связи. Не нарушая общности в обоих случаях стоимость передачи информации также может быть задана таблично. В ячейках таблицы указывается стоимость передачи данных за единицу объема.

Таблица 4.7 – Стоимость каналов передачи данных

	<b>КА<sub>1</sub></b>	...	<b>КА<sub>N</sub></b>	<b>ППИ<sub>1</sub></b>	...	<b>ППИ<sub>M</sub></b>
<b>КА<sub>1</sub></b>	<i>c<sub>11</sub></i>					
...						
<b>КА<sub>N</sub></b>						
<b>ППИ<sub>1</sub></b>						
...		<i>c<sub>ij</sub></i>				
<b>ППИ<sub>M</sub></b>						

Тогда стоимость передачи некоторого информации  $V$  между узлами можно определить по формуле:

$$C_{\text{передачи } ij} = c_{ij} \cdot V, \quad (4.28)$$

Учитывая специфику работы космической системы ДЗЗ для определения стоимости передачи данных каналов связи у которых нельзя явно указать стоимость передачи необходимо привлечение дополнительных экспертов.

#### 4.4 Способы реализации функций $F$ , $T$ , $C$

Предложенные выше модели расчета показателей эффективности включают (см. Рисунок 4.3):

- расчет объема выходной информации – функция  $F$ ;
- расчет времени выполнения –  $T$ ;
- упрощенную модель расчета стоимости –  $C$ .

Их анализ показывает, что реализующие их формулы достаточно просты и в программной реализации могут быть представлены в виде:

1. Полинома, например  $V_{\text{вых}} = aV_{\text{вход}}^2 + bV_{\text{вход}} + c$ , где коэффициенты  $a$ ,  $b$ ,  $c$  задаются экспертами

2. Текстовой формулы в синтаксисе языка программирования, например

$$V_{\text{вых}} = \text{sqrt}(V_{\text{вход}})$$

В этом случае в параметры правой части формулы помимо  $V_{\text{вход}}$  могут входить как длительность процесса, так и общие константы.

3. Таблицы, например в виде таблиц 4.1 – 4.7

4. Внешней вычислительной библиотеки, если расчет показателей связан с привлечением сложной вычислительной процедуры, как например при расчете показателей эффективности КА как узла информационной системы.

Коэффициенты производительности и себестоимости наземных узлов по отношению к процессу обработки могут быть заданы в виде таблицы 4.8, в ячейках которой содержатся соответствующие коэффициенты. Для ППИ, выбранного в качестве эталонного эти коэффициенты равны 1. Если коэффициент производительности равен 0, то предполагается, что процесс на данном ППИ не обрабатывается

Таблица 4.8 – Коэффициенты производительности и себестоимости

	Процесс <sub>1</sub>	Процесс <sub>2</sub>	...	Процесс <sub>z</sub>
ППИ <sub>1</sub>				
...				
ППИ <sub>М</sub>				

#### 4.5 Выводы по главе 4

Обобщая результаты, полученные во 2-й и 3-ей главах, общая модель обработки информации совместно космическим и наземным сегментом представлена как взаимосвязанная последовательность функций изменения условного объема информации при применении к нему соответствующего процесса обработки (функцию изменения трафика).

Формально каждый элемент рассматриваемой системы представляется как функция преобразования объема входной информации в объем выходной информации инвариантно к ее тематическому содержанию, при одновременном вычислении показателей эффективности:

- времени, необходимого для выполнения процесса;
- условной стоимости обработки.

и проверке ограничений:

- на максимальное количество одновременно выполняющихся однотипных процессов;

- на максимальный общий объем памяти.

В рамках такой формализации предложены:

- модель расчета объема выходной информации;
- модель расчета времени выполнения процесса;
- упрощенная модель расчета стоимости

для космических аппаратов, наземных пунктов и линий связи.

Предложены способы программной реализации перечисленных моделей. При этом учитывалась необходимость обеспечения возможности оперативного внесения изменений как в форму представления, так и в параметры модели. В качестве механизмов, которых обеспечат такую возможность предложено формировать их одним из нижеперечисленных способов:

- в виде полинома, коэффициенты которого определяются соответствующими экспертами;
- в виде интуитивно понятной текстовой формулы в синтаксисе языка программирования;
- в виде таблицы вида «аргумент»–«значение» с промежуточной аппроксимацией;
- в самом сложном случае, когда все вышеперечисленные способы не подходят - в виде внешней, подгружаемой с использованием механизмов DLL Windows, вычислительной библиотеки.

## **Глава 5. Методика построения и технический облик программно-моделирующего комплекса для оптимизации распределения потоков целевой информации при функционировании космической системы ДЗЗ**

В предыдущих главах сформирована система взаимосвязанных математические моделей КА и НКПОР как элементов сложной информационной системы. Для моделирования распределения информационных потоков внутри такой неоднородной инфраструктуры разработан комплекс программ.

Цель данной главы – описание архитектуры и порядка применения программно-моделирующего комплекса (ПМК), который реализует предложенную модель организации потоков целевой информации и обеспечивает возможность выполнения перечисленных ниже функций:

- определение состава и характеристик системы, включающей в себя КА, наземные приемные комплексы и каналы связи между ними;
- формирование сценариев работы с данными ДЗЗ;
- формирование входных потоков информации;
- проведение расчетов по распределению целевой информации с разнотипных КА ДЗЗ по составным частям космической системы ДЗЗ;
- визуализация результатов расчетов;
- сохранение полученных результатов.

Программный комплекс позволяет:

- решать оптимизационные задачи планирования как по одному, так по нескольким выбранным критериям (т.е. многокритериальные оптимизационные задачи), характеризующим эффективность целевого распределения потоков целевой информации при функционировании космической системы ДЗЗ;
- в автоматизированном режиме формировать план распределения обработки заявок потребителей по узлам системы;

- оценивать текущее состояние инфраструктуры с точки зрения возможностей обработки заявок потребителей и выявлять возможные проблемы в будущем.

ПМК должен отвечать требованиям экономичности, надежности, удобства использования, открытости архитектуры, сопровождаемости и адекватности.

Под экономичностью здесь понимаются ограничения на затраты времени для получения результатов и объём оперативной памяти.

Выполнение требования по удобству использования должно обеспечиваться за счёт разработки удобной диалоговой программы, облегчающей использование тех или иных возможностей ПМК (доступ к исходным данным, проведение расчётов, построение графиков, внесение изменений в программный код).

Выполнению требования к надёжности ПМК способствует структурирование программы путём создания объектов, характерной чертой которых является инкапсуляция (объединение) данных и алгоритмов их обработки. Инкапсуляция позволяет в максимальной степени изолировать объект от внешнего окружения. Она существенно повышает надёжность разрабатываемой программы, так как локализованные в объекте алгоритмы обмениваются с программой сравнительно небольшими объёмами данных, причём количество и тип этих данных нетрудно тщательно контролировать.

Обеспечение возможности внесения изменений в программный комплекс – открытости архитектуры в процессе эксплуатации происходит за счёт использования в ПМК принципов объектно–ориентированного программирования.

Требование по сопровождаемости подразумевает обеспечение структурированности программы, что обеспечивается вследствие применения аппарата объектно–ориентированного программирования, а также наличие необходимой эксплуатационной документации.

Любая модель должна быть адекватна решаемой задаче, т.е. достоверно отображать существенные для данной задачи свойства системы. При этом совокупность компонентов системы и ее внешней среды, характеристики которых существенно влияют на решение задачи, называются объектом моделирования. В

объект моделирования входят те компоненты системы и среды, структуры и параметры которых признаны определяющими [50]. При этом объект моделирования целесообразно разбить на две части: объект синтеза и внешнюю среду.

Для создания программно-моделирующего комплекса оптимизации распределения потоков целевой информации при функционировании космической системы ДЗЗ объект моделирования можно принять в виде, представленном на рисунке 5.1.

Комплекс построен по принципу модульности и состоит из трех модулей, имеющих условные названия: «Баллистика», «Анализ» и «Планировщик».

Модуль «Баллистика» обеспечивает прогнозирование неуправляемого движения спутников орбитальной группировки с учетом принятой стратегии управления под действием различных возмущающих факторов на интервале планирования. Он служит источником исходных данных для модуля «Анализ». Эфемеридная информация, сформированная однократно в модуле расчета возмущенного движения КА, может быть использована для оценки показателей доступности и точности функционирования группировки, а также стратегии коррекции.

Модуль «Анализ» определяет возможные интервалы времени проведения съемки и сброса информации. Он использует результаты прогнозирования возмущенного движения КА ОГ модулем «Баллистика». При работе с модулем «Анализ» пользователь выбирает файл структуры группировки (эфемеридные данные загружаются автоматически), редактирует параметры вычислений и получает результаты.

Модуль «Планировщик», на основании принятой заявки потребителя, решает задачу оптимизации распределения процессов обработки информации по элементам космической и наземной инфраструктуры. Результатом применения модуля является технологическая карта прохождения заявки по узлам системы, в которой содержится информация по каждому этапу ее обработки (процессу обработки), включающая в себя:

- время поступления процесса в узел для обработки
- время начала выполнения процесса
- время окончания выполнения процесса
- время окончания (с учетом ожидания) передачи данных на последующий узел обработки
- объем входной информации
- объем выходной информации
- время выполнения
- стоимость (обработка+передача)

Архитектура ПМК и схема взаимодействия модулей программы представлена на рисунке 5.1.

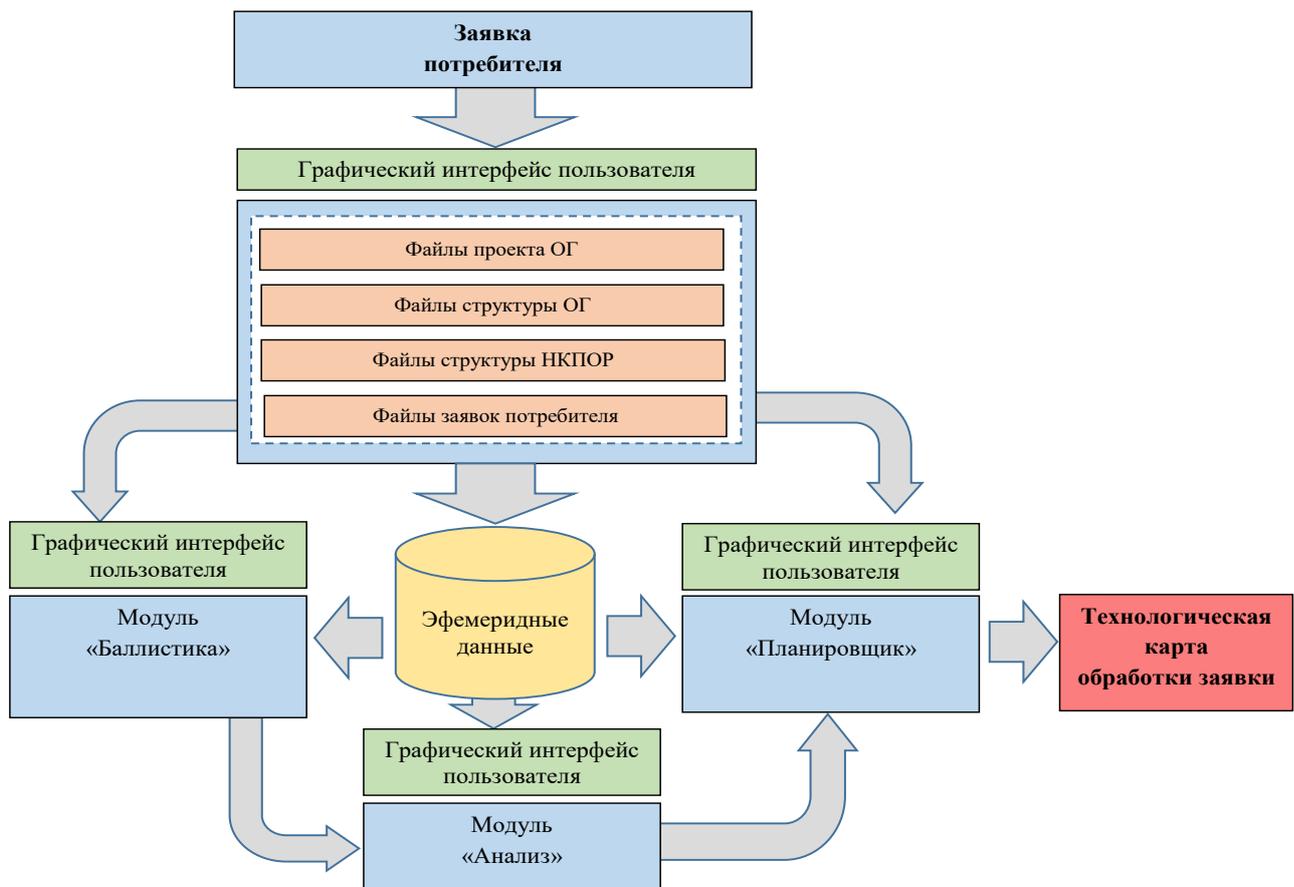


Рисунок 5.1 – Архитектура ПМК

## **5.1 Назначение, выполняемые функции и алгоритм работы модулей**

### **5.1.1 Модуль «Баллистика»**

#### *Назначение модуля*

Модуль «Баллистика» предназначен для проектно-баллистического анализа стабильности орбитального построения группировки спутников и служит источником данных для других модулей.

#### *Выполняемые функции модуля*

Модуль обеспечивает возможность выполнения перечисленных ниже функций:

- формирование исходных данных с использованием графического интерфейса пользователя или загрузка данных, записанных ранее в файл;
- задание параметров расчета, требуемого набора действующих на спутник возмущений;
- настройка формата вывода эфемеридной информации;
- решение задачи высокоточного определения и прогнозирования состояния КА;
- решение задачи определения интервалов проведения орбитальных коррекций КА ДЗЗ;
- визуализация результатов;
- сохранение результатов.

#### *Алгоритм работы модуля*

Алгоритмы работы модуля используют взаимосвязанные математические модели, представленные в главах 2 – 3 и в общем случае выполнение модуля «Баллистика» предполагает следующую последовательность действий:

- формирование исходных данных космического сегмента;
- решение задачи проектно-баллистического анализа космической системы в составе разнотипных КА.

### 5.1.2 Модуль «Анализ»

#### *Назначение модуля*

Модуль «Анализ» предназначен для анализа космической системы в составе разнотипных КА и наземных ППИ в части:

- формирования объектов съемки в виде набора геометрических параметров, характеризующих их произвольную форму и позволяющих проводить формализованную классификацию объектов;
- определения временной последовательности возможных интервалов съемки объектов, выделенных по типу целевой аппаратуры, принадлежащих зонам обзора КА;
- определение временной последовательности возможных интервалов связи с ППИ, доступными по условиям радиовидимости и совместимыми по характеристикам канала радиообмена.

#### *Выполняемые функции модуля*

Модуль обеспечивает возможность выполнения перечисленных ниже функций:

- функции редактирования входных данных;
- функции проведения расчетов по анализу космической системы в составе разнотипных КА и наземных ППИ;
- функции просмотра выходных данных
- функции сохранения результатов в буфер обмена;
- функции сохранения файлов;
- функции вывода оперативных справок (подсказок);

#### *Алгоритм работы модуля*

Алгоритмы работы модуля используют взаимосвязанные математические модели, представленные в главах 2 – 4 и в общем случае выполнение модуля «Анализ» предполагает следующую последовательность действий:

- формирование исходных данных космического и наземного сегментов
- решение задачи анализа космической системы в составе разнотипных КА и наземных ППИ.

### **5.1.3 Модуль «Планировщик»**

#### *Назначение модуля*

Модуль «Планировщик» предназначен для решения задачи распределения потоков целевой информации при функционировании космической системы ДЗЗ, имеющих в своем составе разнотипные КА и наземные ППИ в части:

1. Формирования заявки на объекты съемки в виде набора геометрических параметров, характеризующих их произвольную форму;
2. Формирование сценария обработки заявки в виде последовательности процессов ее обработки;
3. Определения плана обработки заявки (технологической карты) в виде временной последовательности:
  - интервалов съемки объектов, выделенных по типу целевой аппаратуры, принадлежащих зонам обзора КА;
  - интервалов связи с ППИ, доступными по условиям радиовидимости и совместимыми по характеристикам канала радиообмена;
  - реализации процессов тематической обработки спутниковой информации на элементах наземной инфраструктуры.
4. Сохранение результатов и использование их в дальнейших расчетах

#### *Выполняемые функции модуля*

Модуль обеспечивает возможность выполнения перечисленных ниже функций:

- функции редактирования входных данных;
- функции проведения расчетов по распределению целевой информации с разнотипных КА ДЗЗ по составным частям системы;
- функции просмотра выходных данных
- функции сохранения результатов в буфер обмена;
- функции сохранения файлов;

### *Алгоритм работы модуля*

Алгоритмы работы модуля используют взаимосвязанные математические модели, представленные в главах 2 – 4 и в общем случае выполнение модуля «Планировщик» предполагает следующую последовательность действий:

- формирование исходных данных космического и наземного сегментов;
- решение задачи оптимизации распределения потоков целевой информации при функционировании космической системы ДЗЗ в составе разнотипных КА и наземных ППИ.

### **5.1.4 Организация межпрограммного взаимодействия**

Для сложных ПМК, когда число программных модулей достаточно велико, важным является преодоление проблемы передачи данных и межпрограммного взаимодействия. В работе предложено исключить прямое взаимодействие между модулями, а весь обмен данными и командами осуществлять либо через типовые файлы конфигурации, либо с использованием механизма DLL.

В файлах конфигурации модуля содержатся данные настроек в формате ini-файла Microsoft Windows. Несложная структура этого формата имеет достаточно понятный вид для чтения/изменения и позволяет легко обрабатывать их другими программами, что облегчает использование модуля другими ПМК.

Файлы конфигурации — это обычные текстовые файлы, которые можно редактировать и просматривать при помощи любого текстового редактора. Они имеют следующий формат:

```
; некоторый комментарий
# комментарий в стиле Unix
```

```
[Section1]
; комментарий о разделе
var1=значение_1 /* иногда допускается комментарий к отдельному
параметру
```

```
[Section2]
var1=значение_1
var2=значение_2
```

```
; иногда допускается перечислять несколько значений через запятую
[Section3]
```

```

var1=значение_1_1, значение_1_2, значение_1_3
var2=значение_2

; Иногда значения отсутствуют
[Section4.0]
[ViewState]
Mode=
Vid=
FolderType=Generic

; Иногда значения отсутствуют, а есть одни текстовые строки
[Section5.0]
Text string 1
Text string 2...

```

Файл конфигурации файл может содержать:

- пустые строки;
- комментарии — от символа «/\*» до конца строки;
- заголовки разделов — строки, состоящие из названия раздела, заключённого в квадратные скобки «[ ]»;
- значения параметров — строки вида «ключ=значение».

Модуль ПМК «Баллистика» создан на основе библиотеки классов «Simulate+» и ее расширения «Spase» в части программирования задач моделирования движения космических аппаратов. Библиотека «Simulate+» состоит из нескольких модулей, содержащих набор проблемно-ориентированных классов, служащих для представления математических моделей сложных динамических систем и их компонент, средства моделирования и численные методы интегрирования обыкновенных дифференциальных уравнений [104]. Библиотека классов «Spase» используется для построения модели группировки космических аппаратов.

Модуль ПМК «Анализ» использует для оценки доступности и расчета временных интервалов съемки объектов и обмена информацией КА↔ППИ файлы конфигурации с описанием структуры ОГ и эфемеридные данные, получаемые в модуле «Баллистика».

Модуль ПМК «Планировщик» использует для решения задачи сведения о возможных интервалах проведения съемки и связи КА↔ППИ данные, получаемые в модуле «Анализ».

При организации межпрограммного взаимодействия между модулями «Анализ» и «Планировщик» с использованием типового файла в качестве последнего принят файл выходных параметров циклограммы приема данных ДЗЗ, используемый в НЦ ОМЗ АО «Российские космические системы». Пример такого файла представлен на рисунке 5.2.

d	21.03.2018	10:44:49	10:52:49	6620	50	102	41
s	21.03.2018	4:35:45 6.875	6616 6	20.339	41		
s	21.03.2018	4:36:08 10.875	6616 7	38.165	41		
s	21.03.2018	6:10:38 6.75	6617 4	15.933	41		
s	21.03.2018	7:44:19 6.875	6618 2	5.229	41		
s	21.03.2018	9:13:57 15.625	6619 2	43.531	41		
s	21.03.2018	9:18:36 6.875	6619 3	4.137	41		
s	21.03.2018	4:36:34 8	6616 8	1.024	41		
s	21.03.2018	6:10:59 8	6617 5	1.024	41		
s	21.03.2018	7:44:38 8	6618 3	1.024	41		
s	21.03.2018	9:18:54 8	6619 4	1.024	41		
d	21.03.2018	12:18:21	12:24:59	6621	50	102	41
s	21.03.2018	4:25:51 125.875	6616 1	3.484	41		
s	21.03.2018	4:34:39 15.625	6616 5	46.777	41		
s	21.03.2018	10:43:57	13.875 6620	1	8.353	41	
s	21.03.2018	10:46:45	6.875 6620	2	19.051	41	
s	21.03.2018	10:47:33	6.875 6620	3	18.5	41	
s	21.03.2018	10:50:44	8.875 6620	4	5.413	41	
s	21.03.2018	10:53:57	8.875 6620	5	5.611	41	
s	21.03.2018	10:59:55	8 6620	8	1.024	41	
d	21.03.2018	19:54:50	19:59:53	6626	50	102	41
s	21.03.2018	12:21:01	15.625 6621	2	48.105	41	
s	21.03.2018	12:29:00	10.75 6621	4	8.348	41	
s	21.03.2018	18:50:36	7.625 6625	3	23.078	41	
s	21.03.2018	12:33:36	8 6621	6	1.024	41	
s	21.03.2018	18:50:57	8 6625	4	1.024	41	
d	21.03.2018	21:25:31	21:34:01	6627	50	102	41
s	21.03.2018	10:59:25	15.875 6620	7	46.873	41	
s	21.03.2018	12:23:06	8.75 6621	3	35.68	41	
s	21.03.2018	13:58:18	8.875 6622	1	5.383	41	

Рисунок 5.2 – Фрагмент файла межпрограммного обмена

(прием от 21 марта 2018 года, Ресурс-П, НЦ ОМЗ)

Файл состоит из строк d и s.

Строка d:

время начала сброса

время окончания сброса

ВИТОК

номер включения на витке

ППИ КА.

Строка s:

дата съемки время съемки

длительность съемки

виток номер включения на витке

объем маршрута.

Во входные текстовые файлы входит также дата и время начала обработки (т.е. дата непосредственного приема информации, а не съемки), ППИ, номер КА, начальный объем (в Гб).

Еще одним способом взаимодействия модулей «Баллистика» и «Планировщик» является использование механизма динамически подключаемой библиотеки Windows (dll), в которую необходимые данные, описывающие процесс обработки, а результатом являются объем информации на выходе процесса, время, необходимое для его реализации и стоимость.

## **5.2 Описание модулей**

### **5.2.1 Модуль «Баллистика»**

Данный модуль предназначен для расчета орбитальных параметров космических аппаратов ОГ с учетом их эволюции на заданном участке функционирования под действием различных возмущений: гравитационного поля Земли, притяжения Луны и Солнца.

Блок 1 модуля «Формирование исходных данных» служит для описания орбитальной группировки при помощи графического интерфейса «Конструктор группировки» (рисунок 5.5) или путем загрузки ранее сохраненной конфигурации ОГ.

#### *Входные данные*

В результате формирования ОГ создается два файла исходных данных: файл-проект группировки (тип файла: «kproj») и файл структуры группировки (тип файла: «csc»), расширяющий описание файла-проекта группировки.

Фрагменты файлов исходных данных для модуля «Баллистика» представлены на рисунках (рисунки 5.3, 5.4). В результате конфигурирования пользователем параметров ОГ в диалоговом окне «Конструктор группировки» и выполнения команд «Создать группировку» – «Подтверждение», модуль «Баллистика» автоматически формирует ИД: файл проекта и файл структуры, которые в дальнейшем используется при моделировании.

Описание файла проекта содержит следующие данные:

- а) наименование ОГ;
  - идентификатор ОГ («Ident»);
  - описание ОГ («Title»);
- б) параметры ОГ;
  - количество плоскостей («Planes»);
  - количество КА в плоскости («SatPerPlane»);
- в) параметры КА ОГ;
  - начальную эпоху всех КА ОГ определяет параметр «IniDateTIme», для смещение часового пояса введен параметр «ZonalShift».
  - эксцентриситет орбит («Eccentricity»);
  - наклонение орбит («Inclination», градусы);
  - долготы восходящих узлов орбит («Nodes», градусы) записываются в виде набора значений, каждый элемент которого соответствует определенному спутнику из состава ОГ;
  - аргумент перигея («PerigeeArg», градусы);
  - расположение КА в плоскости определяется одним из трех параметров: аргументом широты («SlotKind=0»), временем движения КА до восходящего узла («SlotKind=1»), средней аномалией («SlotKind=2»); набор значений для выбранного параметра («SlotKind») содержит поле «Slots»; полагается, что время движения КА до восходящего узла орбиты записано в секундах, а значения аргумента широты и средней аномалии – в градусах;

- синхронность («SynchroCode»);
  - большая полуось («SemiMajorAxis», км);
- г) модель движения КА описывается параметром «Model», при этом значению «Model=1» соответствует модель Ньютона; для моделирования доступны другие модели (модель Кеплера, модель C20);
- д) возмущения;
- порядок ГПЗ записывается в поле «GraviDegree»;
  - Параметр «Perturbations» содержит флаги других возмущений, учитываемых при моделировании группировки, могут учитываться следующие возмущения:
    - гравитация Луны;
    - гравитация Солнца;
    - давление света;
    - торможение атмосферой;
    - тяга двигателя;
- е) свойства КА;
- характерная площадь для вычисления силы аэродинамического торможения («Sd», м<sup>2</sup>);
  - характерная площадь для вычисления силы давления света («Sr», м<sup>2</sup>);
  - коэффициент силы торможения атмосферой («Cd»);
  - коэффициент силы давления солнечного света («Cr»);
  - масса («Mass», кг);
  - тяга ДУ («Thrust», Н)
  - угол обзора аппаратуры («View», градусы);
- ж) настройка вывода эфемерид;
- флаг для включения вывода эфемерид («CreateEphemFile»);
  - Установка параметра «CreateEphemFile=1» соответствует выводу эфемерид по времени, «CreateEphemFile=2» – в восходящем узле орбиты, «CreateEphemFile=0» – вывод эфемерид отключен.

- набор выводимых эфемерид («PrintList»)

```

[[Structure]
Ident=Test2
Title=walker
InidateTime=01/01/18
ZonalShift=00:00:00
StruckKind=1
walkerT=6
WalkerF=2
Planes=3
SatPerPlane=2
Synchro=1
SynchroCode=001(0015)
SunSynchro=1
SemiMajorAxis=6948.5121
Eccentricity=0.0
PerigeeArg=270
Inclination=97.6873
SlotKind=3
Nodes=<0;120;240>
Slots=<0;180><120;300><240;60>
OperationCycle=10
[SatInfo]
Model=1
DrawCaption=1
Cd=2.5
Cr=2
Sd=5
Sr=5
Mass=1500
Thrust=1
view=10
Perturbations=7
GraviDegree=2
CreateEphemFile=2
PrintList=[0-14,16-18,26-27,29]
DistList=[ NULL ]
NodeLogOrder=1
[FORMKEEP]
VcTank=60
LongBox=5
EccBox=10
PeriBox=20

```

Рисунок 5.3 – Фрагмент файла проекта

После создания файла проекта на его основе строится файл структуры, который используется в модуле «Баллистика» для моделирования возмущенного движения независимо от файла проекта.

- Файл структуры включает описание ИД в части описания ОГ, содержащихся в файле проекта, и расширяет его описание следующей информацией: параметры моделирования (раздел «[Settings]» файла структуры);
  - метод численного решения ДУ;
  - интервал времени моделирования;
  - шаг интегрирования;

- шаг вывода эфемерид;
- масштаб времени вывода эфемерид;

```

AkelPad - [H:\Current_Updates\SimCon\DATA\Test2.csc]
Test2.csc
[Settings]
Integration method=2
PropInterval=3
PropStep=60
PrintStep=600
PrintStepUnit=0
PrintMasterKey=1
EphemTimeUnit=2
PropStepUnit=0
PropIntUnit=3
InidateTime=01/01/18
ZonalShift=00:00:00
PrintSunEphem=0
ShowTrack=1
ShowAllTracks=1
ShowStations=1
ShowShadow=0
ShowVisibility=0
ShowView=0
ShowMap=1
SunLabel=0
MoonLabel=0
SatLabels=0
DrawSituation=1
TrackWidth=1
StopFlags=0
Hmin=150
Emax=0.99999
SatCount=6
[Gravitation]
GravFilesPath=D:\SimCon\BIN\GRAVI\
GravFile=JGM3.JCS
[Atmosphere]
AtmoModel=0
AtmoFile=
F10_7=100
F10_7M=100
Kp=4
DSAFfilesPath=D:\SimCon\BIN\DSA84\
[SAT-0]
SatID=SAT-0
Model=1
PeriAlt=577.34709513001
Eccentricity=0
LatitudeArg=0
PerigeeArg=270
Inclination=97.6872673951539
AscNode=0
Synchrocode=001(0015)
65:1      Изменён      Ins Win 1251 (ANSI - кириллица)

```

Рисунок 5.4 – Фрагмент файла структуры

- б) параметры визуализации моделирования (раздел «[Settings]» файла структуры);
- в) используемая модель ГПЗ (раздел «[Gravitation]» файла);
- г) используемая модель атмосферы (раздел «[Atmosphere]» файла);
- д) описание параметров спутников ОГ независимо друг от друга (файл структуры содержит соответствующие каждому спутнику разделы, например: «[SAT-0]»)

Выделение секции описания под каждый спутник позволяет производить детальную настройку параметров спутников инструментами модуля ПМК

«Баллистика», общее описание которых было сформировано на основе файла проекта.

Параметры моделирования задаются на этапе конфигурирования ОГ. При необходимости редактирование файла структуры группировки («\*.csc») после создания ОГ при помощи «Конструктора группировки» производится вызовом диалогового окна из пункта «Данные» в главном меню модуля ПМК «Баллистика».

### *Работа с модулем*

На рисунке 5.6 представлен интерфейс для настройки режима моделирования загруженной орбитальной группировки.

Для детального конфигурирования параметров отдельных спутников, входящих в состав орбитальной группировки, следует использовать интерфейс, продемонстрированный на рисунке 5.7.

Рисунок 5.5 – Графический интерфейс конструктора группировки

The screenshot shows the 'Parameters' dialog box for a simulation. The window title is 'D:\SimCon\DATA\Test2.csc'. The 'Modeling' section includes:
 

- Интегратор: Рунге-Кутта 4
- Интервал времени: 3 сут
- Шаг интегрирования: 60 сек
- Шаг вывода эфемерид: 600 сек
- Масштаб времени вывода эфемерид: час

 The 'Initial date/time' section includes:
 

- Дата: 01/01/18
- Местное время: 00:00:00
- Сдвиг (+/-GMT): +00:00:00
- Отрисовка включена (checked)
- Общий ключ файлов регистрации (checked)

 The 'Stop conditions' section includes:
 

- по времени (checked)
- ИЛИ высота перигея стала меньше чем: 150 км
- ИЛИ эксцентриситет орбиты стал больше чем: 0.99999

 Buttons at the bottom are 'OK' and 'Отмена'.

Рисунок 5.6 – Параметры моделирования

The screenshot shows the 'Edit satellite parameters' dialog box for satellite 'SAT-0'. The window title is 'D:\SimCon\DATA\Test2.csc'. The 'Current KA' is 'SAT-0' and the 'Model' is 'Ньютон'. The 'Initial conditions' section includes:
 

- Высота перигея, км: 577.34709513001
- Эксцентриситет: 0
- Арг. широты, град: 0
- Арг. перигея, град: 270
- Наклонение, град: 97.687267395153
- ДВУ, град: 0

 The 'Disturbances' section includes:
 

- Порядок ГПЗ: 2
- Гравитация Солнца (unchecked)
- Гравитация Луны (unchecked)
- Торможение атмосферой (unchecked)
- Солнечный ветер (unchecked)
- Коррекции орбиты (unchecked)

 The 'KA properties' section includes:
 

- Сх: 2.5, Sx: 5 m2
- Сг: 2, Sг: 5 m2
- m, kg: 1500, γ: 10 град
- P, H: 1, Δ: 0 минут

 The 'Output' section includes:
 

- Вывод эфемерид...: В восходящем узле
- Кратн: 1
- Вывод координат Луны и Солнца (АГЭСК) (unchecked)

 Buttons at the bottom are 'Применить', 'OK', and 'Отмена'.

Рисунок 5.7 – Окно редактирования параметров отдельных спутников

При работе блока 2 «Вычисление эфемерид» осуществляется моделирование движения всех КА орбитальной группировки путем численного интегрирования дифференциальных уравнений возмущенного движения. Блок 3 «Визуализация результатов расчета» служит для отработки процедур построения трасс

космических аппаратов из состава ОГ, зон радиовидимости, зон покрытия КА, отображения статуса проведения процесса моделирования.

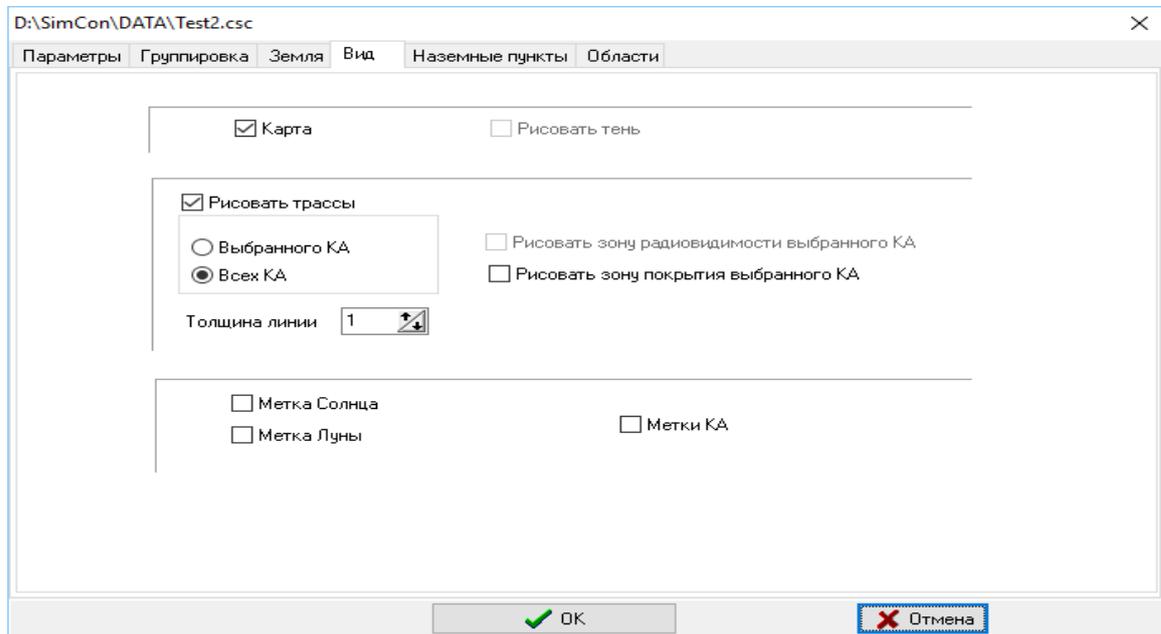


Рисунок 5. 8 – Настройка параметров визуализации

Блок 4 «Вывод результатов моделирования в файлы» выполняет запись заданного набора эфемерид в файлы с расширением «dat», помещаемые в директорию с описанием структуры ОГ. Настройка набора эфемерид, выводимого в файлы, осуществляется при помощи диалогового окна, представленного на рисунке 5.9.

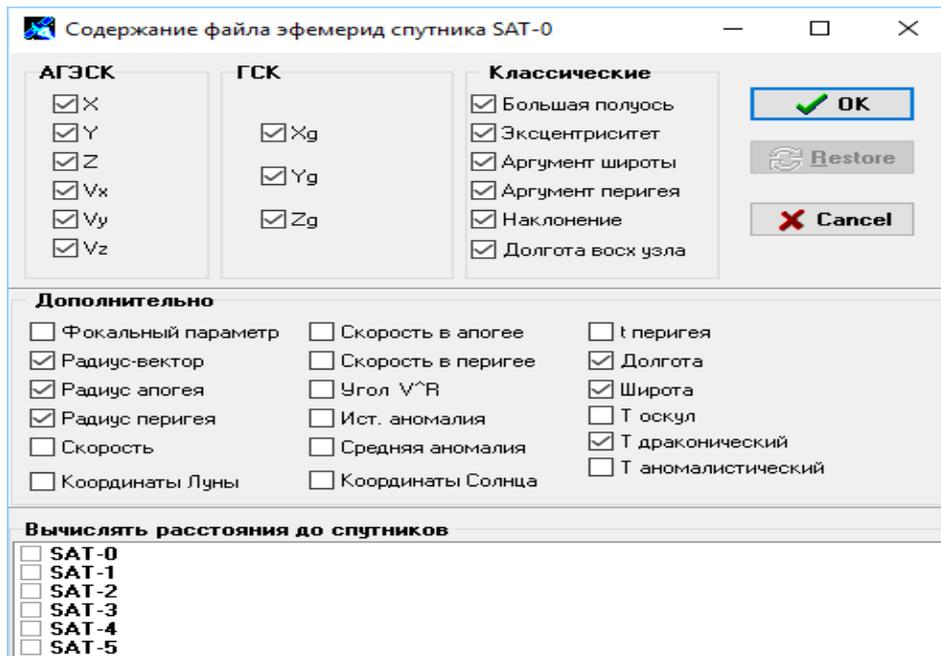


Рисунок 5.9 – Набор выводимых эфемерид

### *Выходные данные*

Модуль моделирования возмущенного движения формирует файлы с набором выходных данных, содержание которых пользователь ПМК может настраивать требуемым образом.

Орбитальные параметры каждого КА из состава ОГ записываются в файлы в процессе моделирования с задаваемым шагом. Полный набор эфемеридной информации содержит следующие параметры для каждого спутника ОГ:

- а) координаты в АГЭСК:
  - координаты  $X, Y, Z$  в АГЭСК;
  - проекции вектора скорости на  $OX, OY, OZ$  в АГЭСК;
  - координаты КА в гринвичской системе координат;
- б) Кеплеровы элементы орбиты;
  - большая полуось орбиты;
  - эксцентриситет орбиты;
  - аргумент широты КА;
  - аргумент перицентра орбиты;
  - наклонение орбиты;

- долгота восходящего узла в АГЭСК;
- в) другие параметры:
  - радиус-вектор КА;
  - радиус апогея орбиты;
  - радиус перигея орбиты;
  - скорость движения в апоцентре орбиты;
  - скорость движения в перицентре орбиты;
  - долгота подспутниковой точки;
  - широта подспутниковой точки;
  - драконический период обращения;
  - расстояние от КА до Солнца (АЕ);
  - долгота Солнца;
  - широта Солнца;
  - расстояние от КА до Луны (ЛЕ);
  - долгота Луны;
  - широта Луны;

Полный набор эфемерид показан на рисунке 5.10.

Фрагмент файла эфемерид показан на рисунке 5.11.

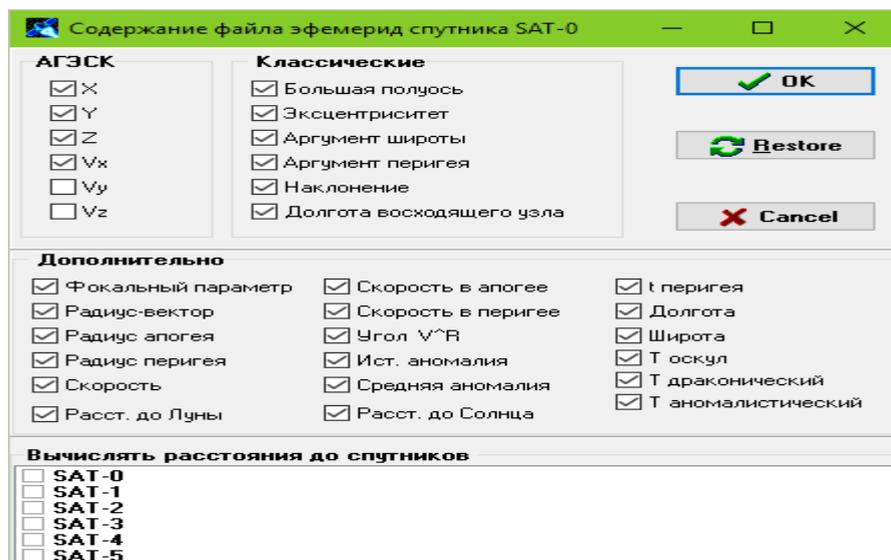


Рисунок 5.10 – Полный набор эфемерид КА

Lister - [d:\DOCUMENTS\КОСМОЭКСПОРТ\2018\РАБМАТ\SAT-0.dat]

Т	Rev	ST	Date	Time	X	Y	Z
0.000000E+0000	0	1.005997E+0002	01/01/18	00:00:00	-4.000000E+0003	6.928203E+0003	0.000000E+0000
7.113975E+0003	1	1.304311E+0002	01/01/18	01:59:00	-3.979485E+0003	6.936808E+0003	-1.941503E+0000
1.422795E+0004	2	1.602626E+0002	01/01/18	03:58:00	-3.961071E+0003	6.949040E+0003	1.221245E+0000
2.134195E+0004	3	1.898433E+0002	01/01/18	05:56:00	-3.941319E+0003	6.959062E+0003	1.582068E+0000
2.845601E+0004	4	2.196748E+0002	01/01/18	07:55:00	-3.922074E+0003	6.970137E+0003	2.046974E+0000
2.347621E+0005	33	1.528018E+0000	03/01/18	17:13:00	-3.350537E+0003	7.261974E+0003	-3.108624E+0000
2.418761E+0005	34	3.135947E+0001	03/01/18	19:12:00	-3.330440E+0003	7.271397E+0003	-2.331468E+0000
2.489901E+0005	35	6.094024E+0001	03/01/18	21:10:00	-3.310495E+0003	7.281219E+0003	7.660539E+0000
2.561042E+0005	36	9.077169E+0001	03/01/18	23:09:00	-3.289818E+0003	7.289284E+0003	2.081668E+0000

[LEGEND]  
T=Системное время (с)  
Rev=Виток  
ST=Звездное время (град)  
Date=Дата (д/м/г)  
Time=Время (ч:м:с)  
X=Координата X АГЭСК [км]  
Y=Координата Y АГЭСК [км]  
Z=Координата Z АГЭСК [км]  
Ux=Проекция скорости на ось X АГЭСК [км/с]  
Uy=Проекция скорости на ось Y АГЭСК [км/с]  
Uz=Проекция скорости на ось Z АГЭСК [км/с]  
Xg=Координата X ГСК [км]  
Yg=Координата Y ГСК [км]  
Zg=Координата Z ГСК [км]  
A=Большая полуось [км]  
E=Эксцентриситет  
U=Аргумент широты [град]  
W=Аргумент перигея [град]  
i=Наклонение к экватору [град]  
Node=Долгота восходящего узла [град]  
R=Радиус [км]  
Ra=Радиус апогея [км]  
Rp=Радиус перигея [км]  
Long=Географическая долгота [град]  
Lat=Географическая широта [град]  
Td=Драконический период обращения [с]  
Dsun=Расстояние до Солнца [АЕ]  
Lsun=Долгота Солнца [град]  
Fsun=Широта Солнца [град]  
Dmoon=Расстояние до Луны [АЕ]  
Lmoon=Долгота Луны [град]  
Fmoon=Широта Луны [град]

Рисунок 5.11 – Фрагмент файла эфемерид одного из КА

## 5.2.2 Модуль «Анализ»

Модуль «Анализ» предназначен для анализа космической системы в составе разнотипных КА и наземных ППИ в части: формирования объектов съемки в виде набора геометрических параметров, характеризующих их произвольную форму и позволяющих проводить формализованную классификацию объектов; определения съемочного плана в виде временной последовательности возможных интервалов съемки объектов, выделенных по типу целевой аппаратуры, принадлежащих зонам обзора КА; определение временной последовательности возможных интервалов связи с ППИ, доступными по условиям радиовидимости и совместимыми по характеристикам канала радиообмена.

*Входные данные*

Входными данными для модуля «Анализ» являются

1. Перечень наземных пунктов

2. Перечень КА спутниковой группировки.

3. Данные по эволюции орбиты каждого КА группировки хранятся в отдельном каталоге в файле, имя которого совпадает с идентификатором КА и имеет расширение «.dat». Файл может быть создан с помощью модуля «Баллистика» или другой сторонней программы. Структура файла имеет следующий вид:

## Структура файла эволюции КА

T	Rev	ST	X	Y	Z	Vx	Vy	Vz	R	Long	Lat
0.000000E+0000	-1	1.755298E+0002	-3.417458E+0003	5.096473E+0003	-3.019685E+0003	2.758257E+0000	-2.156503E+0000	-6.788032E+0000	6.838973E+0003	-5.168580E+0001	-2.620222E+0001
8.640000E+0004	14	1.765154E+0002	3.875660E+0003	-4.054572E+0003	-3.947357E+0003	2.129429E+0000	-3.953352E+0000	6.149345E+0000	6.858711E+0003	1.371922E+0002	-3.513638E+0001
1.728000E+0005	30	1.775011E+0002	-1.220560E+0002	-1.218212E+0003	6.722660E+0003	-4.911805E+0000	5.769840E+0000	9.428522E-0001	6.833235E+0003	8.677740E+0001	7.967858E+0001
2.592000E+0005	45	1.784867E+0002	-3.885998E+0003	5.048120E+0003	-2.491593E+0003	2.505227E+0000	-1.533409E+0000	-7.049267E+0000	6.840507E+0003	-5.089796E+0001	-2.136088E+0001
3.456000E+0005	60	1.794724E+0002	3.888501E+0003	-3.538251E+0003	-4.403916E+0003	2.709183E+0000	-4.185104E+0000	5.754928E+0000	6.858144E+0003	1.382277E+0002	-3.995188E+0001
4.320000E+0005	76	1.804580E+0002	3.314374E+0002	-1.630007E+0003	6.626617E+0003	-5.195496E+0000	5.373500E+0000	1.568489E+0000	6.832190E+0003	1.010355E+0002	7.590918E+0001
5.184000E+0005	91	1.814437E+0002	-4.323957E+0003	4.927314E+0003	-1.959345E+0003	2.187375E+0000	-9.459833E-0001	-7.254062E+0000	6.842080E+0003	-5.017514E+0001	-1.664057E+0001
6.048000E+0005	106	1.824293E+0002	3.835560E+0003	-3.017139E+0003	-4.817626E+0003	3.287378E+0000	-4.329441E+0000	5.331208E+0000	6.857417E+0003	1.393813E+0002	-4.463134E+0001
6.912000E+0005	122	1.834150E+0002	8.125628E+0002	-1.975129E+0003	6.488824E+0003	-5.414868E+0000	4.932850E+0000	2.166978E+0000	6.831268E+0003	1.089472E+0002	7.178147E+0001
7.776000E+0005	137	1.844006E+0002	-4.724285E+0003	4.741086E+0003	-1.428007E+0003	1.812359E+0000	-4.034621E-0001	-7.404878E+0000	6.843681E+0003	-4.950230E+0001	-1.204387E+0001
8.640000E+0005	152	1.853862E+0002	3.719832E+0003	-2.501824E+0003	-5.188047E+0003	3.853731E+0000	-4.389357E+0000	4.884329E+0000	6.856538E+0003	1.406904E+0002	-4.917036E+0001

... ..

2.246400E+0006	398	2.011566E+0002	3.793602E+0003	-2.622774E+0003	5.036462E+0003	-5.379639E+0000	1.957344E+0000	5.066827E+0000	6.829078E+0003	1.241847E+0002	4.751910E+0001
2.332800E+0006	413	2.021423E+0002	-6.108602E+0003	2.700691E+0003	1.533950E+0003	-1.155937E+0000	1.605298E+0000	-7.362563E+0000	6.852864E+0003	-4.599308E+0001	1.293472E+0001
2.419200E+0006	428	2.031279E+0002	1.992660E+0003	2.016384E+0001	-6.551950E+0003	6.575245E+0000	-3.287927E+0000	2.002933E+0000	6.848295E+0003	1.574519E+0002	-7.308297E+0001
2.505600E+0006	444	2.041135E+0002	4.237346E+0003	-2.513708E+0003	4.729324E+0003	-5.174200E+0000	1.492024E+0000	5.426904E+0000	6.829373E+0003	1.252089E+0002	4.382814E+0001
2.592000E+0006	459	2.050992E+0002	-6.156914E+0003	2.282489E+0003	1.965157E+0003	-1.689584E+0000	1.712050E+0000	-7.232394E+0000	6.854137E+0003	-4.543993E+0001	1.666116E+0001

## [LEGEND]

T=Системное время (с)

Rev=Виток

ST=Звездное время (град)

X=Координата X АГЭСК [км]

Y=Координата Y АГЭСК [км]

Z=Координата Z АГЭСК [км]

Vx=Проекция скорости на ось X АГЭСК [км/с]

Vy=Проекция скорости на ось Y АГЭСК [км/с]

Vz=Проекция скорости на ось Z АГЭСК [км/с]

R=Радиус [км]

Long=Географическая долгота [град]

Lat=Географическая широта [град]

Файл представляет собой таблицу, в которой

- 7) первая строка содержит идентификаторы столбцов;
- 8) строки до раздела [LEGEND] содержат данные по эволюции вектора состояния;
- 9) в разделе [LEGEND] содержится описание столбцов таблицы:
  - в столбце T приведено время в секундах от начала моделирования;
  - в столбцах X, Y, Z. Vx, Vy, Vz приведены параметры вектора состояния в инерциальной системе координат;
  - в столбцах R, Long, Lat содержатся значения радиуса вектора, а также долгота и широта подспутниковой точки в географической системе координат соответственно.

В представленном выше примере данные приведены с шагом в одни сутки. При формировании данных необходимо учитывать, что в промежутках они аппроксимируются с помощью формул невозмущенного движения в центральном поле тяготения.

Выбранная структура файла позволяет формировать исходные данные по эволюции КА с требуемой степенью детализации.

Моменты времени для проведения коррекций также записываются в текстовый файл и используются в модулях «Анализ» и «Планировщик».

1. Данные о наземном пункте обработки информации хранятся в файле конфигурации, структура которого имеет вид:

```
[params]
name=GS001
title=НЦ ОМЗ
caption=Москва-НЦ ОМЗ НКПОР-О
position.long(deg)=3.761764000000000E+01 /* долгота
position.lat(deg)=5.575581000000000E+01 /* широта
position.R(km)=6.378137000000000E+03 /* расстояние от центра Земли
radarcount=1 /* кол-во приемно-передающих антенн
[gradar_001]
name=gradar_001
title=gradar_001
caption=gradar_001
mask(deg)=0.00000E+00 /* минимальный угол возвышения (град., отсчет
от горизонта)
```

здесь:

Ключ	Описание данных
раздел [params]	
name	уникальный идентификатор (совпадает с именем каталога)
title	краткое название
caption	более детальное название
position.long(deg)	географическая долгота
position.lat(deg)	географическая широта
position.r(km)	расстояние от центра Земли
radarcount	количество приемо-передающих антенн для связи с КА.

В соответствии с параметром radarcount формируются разделы описания приемо-передающих антенн, каждая из которых имеет идентификатор «gradar\_001», «gradar\_002» и т.д.:

Ключ	Описание данных
раздел [gradar_...]	
name	уникальный идентификатор (совпадает с именем каталога)
title	краткое название
caption	более детальное название
mask(deg)	минимальный угол возвышения от горизонта (угол маски) для определения условия «видимости» КА с наземного пункта

Пиктограмма наземного пункта содержится растровом файле

2. Данные о КА, входящем в группировку ДЗЗ хранятся в файле конфигурации, структура которого имеет вид:

```
[params]
name=RESURS-P-1
title=Ресурс-П-1
caption=«Ресурс-П» №1
mask(deg)=5.000000000000000E+00 /* мин. угол возвыш. (град., отсчет от
горизонта)
radarcount=4 /* кол-во установленной на КА съемочной аппаратуры
visible=1 /* «Ресурс-П» №1
visibility.visible=0 /* зона видимости КА с поверхности Земли
info.visible=0 /* краткая текстовая информация о КА
trassa.visible=1 /* трасса КА
ground_controls.visible=0 /* пункты приема и передачи информации
radars.visible=0 /* съемочная аппаратура на борту КА
```

```

[datatransfer]
GS001=radar_001 /* НЦ ОМЗ
GS002= /* ЦОД РКС
GS003= /* Планета
GS004= /* Долгопрудный
GS005= /* Железногорск
GS006= /* Калининград
GS007= /* Мурманск
GS008= /* Мурманск
GS009= /* Новосибирск
GS010= /* Обнинск
GS011= /* Самара
GS012= /* Хабаровск
GS013= /* Циолковский
GS014= /* Анадырь
GS015= /* Анино
GS016= /* Дудинка
GS017= /* Калязин
[radar_001]
name=MBK
title=Геотон
caption=Многозональная высокодетальная камера
camera.swathwidth.nominal(km)=3.80000000000000E+01 /* полоса захвата
(в надире)
camera.swathwidth.max(km)=9.50000000000000E+02 /* ширина полосы обзора
[radar_002]
name=SMKVR
title=ШМСА-ВР
caption=Широкозахватная мультиспектральная камера высокого разрешения
camera.swathwidth.nominal(km)=3.80000000000000E+01 /* полоса захвата
(в надире)
camera.swathwidth.max(km)=9.50000000000000E+02 /* ширина полосы обзора
[radar_003]
name=SMKSR
title=ШМСА-СР
caption=Широкозахватная мультиспектральная камера среднего разрешения
camera.swathwidth.nominal(km)=3.80000000000000E+01 /* полоса захвата
(в надире)
camera.swathwidth.max(km)=9.50000000000000E+02 /* ширина полосы обзора
[radar_004]
name=GSA
title=ГСА
caption=Гиперспектральная съемочная аппаратура
camera.swathwidth.nominal(km)=3.80000000000000E+01 /* полоса захвата
(в надире)
camera.swathwidth.max(km)=9.50000000000000E+02 /* ширина полосы обзора

```

**здесь:**

Ключ	Описание данных
раздел [params]	
name	уникальный идентификатор (совпадает с именем каталога)
title	краткое название
caption	более детальное название
mask(deg)	условие видимости КА наземным потребителем (угол маски потребителя)
radarcount	количество установленных на КА камер наблюдения
Visible	признак возможности отрисовки КА и информации о нем на карте (0-нет, 1-да)
visibility.visible	признак возможности отрисовки зон видимости КА потребителем (0-нет, 1-да)
info.visible	признак возможности отрисовки текстовой информации о КА (0-нет, 1-да)
trassa.visible	признак возможности отрисовки трассы (0-нет, 1-да)
ground_controls.visible	признак возможности отрисовки связанных с КА наземных пунктов (0-нет, 1-да)
radars.visible	признак возможности отрисовки зон наблюдения ботовой аппаратурой (0-нет, 1-да)

В соответствии с параметром radarcount формируются разделы описания камер наблюдения, каждая из которых имеет идентификатор «radar\_001», «radar\_002» и т.д.:

Ключ	Описание данных
раздел [radar_...]	
Name	уникальный идентификатор (совпадает с именем каталога)
Title	краткое название
Caption	более детальное название
camera.swathwidth.nominal(km)	полоса захвата (в надире)
camera.swathwidth.max(km)	ширина полосы обзора

Пиктограмма наземного пункта содержится растровом файле

3. Данные о районе обслуживания хранятся в двухцветном растровом графическом файле с требуемой степенью детализации. При этом каждой точке этого файла ставится в соответствие район на карте с учетом того, что размеры

картинки соответствуют по горизонтали интервалу долготы  $[-180^{\circ}, +180^{\circ}]$  (слева направо), а по вертикали – интервалу широты  $[+90^{\circ}, -90^{\circ}]$  (сверху вниз) (рисунок 5.12).

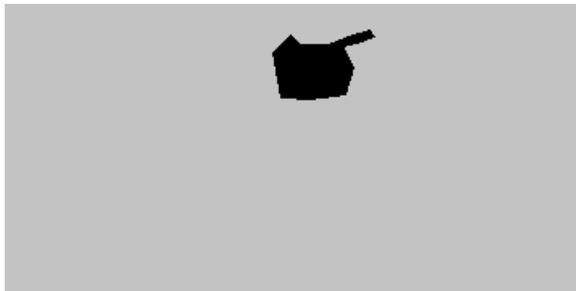


Рисунок 5.12 – Файл данных о районе съемки

При этом:

- размеры картинки в файле определяются пользователем;
- цвет фона определяется автоматически по цвету левой - верхней точки;
- файл данных о районе съемки может храниться в любом месте.

#### *Работа с модулем*

Далее представлен интерфейс для работы с модулем, которая условно может быть разделена на этапы:

- этап корректировки исходных данных;
- этап расчета временных интервалов возможных сеансов связи с наземными пунктами
- этап расчета возможных интервалов проведения съемок.

Вычисления проводятся последовательно для каждого КА ОГ.

#### *Подготовка исходных данных по КА*

При подготовке и коррекции данных по КА возможно (рисунки 5.13, 5.14)

- сформировать описание КА;
- указать условия видимости КА потребителем;

- определить перечень и провести коррекцию параметров съемочной аппаратуры;
- установить категории объектов для графического представления в основном окне программы.

Космический аппарат

**Исходные данные**

Краткое название  
Ресурс-П-1

Полное название  
«Ресурс-П» №1

Минимальный угол возвышения, град (отсчет от горизонта)  
5.0000

Отрисовка

**Аппаратура наблюдения**

Название  
Геотон  
ШМСА-ВР  
ШМСА-СР

**Параметры отрисовки**

Зона видимости с поверхности Земли

Краткая текстовая информация

Трасса

Пункты приема и передачи информации

Наблюдаемые области

Выход

Рисунок 5.13 – Параметры КА

Бортовая аппаратура наблюдения

Краткое название  
Геотон

Полное название  
Многозональная высокодетаальная камера

Полоса захвата, км. (в надире)  
38.000

Ширина полосы обзора, км.  
950.000

OK Отказ

Рисунок 5.14 – Параметры аппаратуры наблюдения

### *Подготовка исходных данных по наземным пунктам*

При подготовке и коррекции данных по наземным пунктам возможно (рисунки 5.15, 5.16):

- сформировать описание наземного пункта;
- указать географическое расположение и расстояния до центра Земли;

- определить перечень и провести коррекцию параметров приемно-передающих антенн;
- для каждой антенны установить перечень и провести коррекцию параметров обслуживаемых КА.

Рисунок 5.15 – Параметры наземного пункта

Рисунок 5.16 – Параметры приемно-передающей антенны

На основании сформированных в модуле исходных данных и результатов расчетов, проведенных с использованием модуля «Баллистика» имеется возможность определить либо все возможные, либо ближайшие интервалы времени для:

- проведения сеансов(а) связи ППИ→КА;
- проведения съемки выбранного объекта;

- проведения сеансов(а) связи КА→ППИ.

### *Выходные данные*

По окончании процесса вычислений формируются текстовые файлы результатов и, при необходимости, соответствующие записи в файл межпрограммного обмена (рисунок 5.2).

Выходными данными являются:

1. Интервалы времени нахождения КА в зоне видимости ППИ;

Формируются два файла.

В первом файле содержится информация о всех интервалах, а во втором – только о ближайшем. Формат файлов одинаков. Ниже представлен пример файла результатов нахождения КА «RESURS-P-1» в зоне видимости антенны «gradar\_001» ППИ «GS001» (НЦ ОМЗ). Имя файла:

Результаты:

N	TimeEnter(sec)	TimeExit(sec)	dT(sec)
0001	9087.00	9088.00	1.00
0002	9094.00	9099.00	5.00
0003	9100.00	9205.00	105.00
0004	9207.00	9211.00	4.00
0005	14367.00	14919.00	552.00
0006	19866.00	20530.00	664.00
...	...	...	...
0128	1136053.00	1136533.00	480.00
0129	1141494.00	1142146.00	652.00
0130	1147114.00	1147707.00	593.00
0131	1187569.00	1188182.00	613.00

В первой строке содержатся идентификаторы столбцов:

- N – порядковый номер интервала;
- TimeEnter(sec) – время начала возможного сеанса;
- TimeExit(sec) – время окончания возможного сеанса;
- dT(sec) – продолжительность возможного сеанса;

Второй файл имеет аналогичную структуру с той лишь разницей, что данные приведены только для N=0001.

2. Интервалы времени необходимые для проведения съемок района наблюдения.

В первом файле содержится информация о всех интервалах, а во втором – только о ближайшем. Формат файлов одинаков. Ниже представлен пример файла результатов нахождения КА «RESURS-P-1» в зоне видимости антенны «gradar\_001» ППИ «GS001» (НЦ ОМЗ). Имя файла:

Результаты:

```
N   TimeEnter(sec)   TimeCover(sec)   TimeExit(sec)   dT(sec)
...   ...           ...           ...           ...
```

В первой строке содержатся идентификаторы столбцов:

N – порядковый номер интервала;

TimeEnter(sec) – время начала наблюдения;

TimeCover(sec) – время окончания наблюдения;

TimeExit(sec) – время, когда аппаратура наблюдения КА полностью перестает видеть район наблюдения;

dT(sec) – продолжительность интервала наблюдения

$dT = \text{TimeCover} - \text{TimeExit}$ ;

### 5.2.3 Модуль «Планировщик»

Модуль предназначен для решения задачи оптимизации распределения целевой информации с разнотипных КА ДЗЗ по составным частям рассматриваемой системы.

Подготовка исходных данных возможна

- в режиме начальной установки программы;
- в обычном режиме
- в режиме корректировки текстовых файлов исходных данных.

В режиме начальной установки происходит первоначальная настройка файлов конфигурации программ. На этом этапе могут быть использованы установочные файлы сценариев (скрипты).

В обычном режиме пользователь с помощью диалога имеет возможность модификации данных. При этом пользователь не может изменить количество наземных пунктов и перечень КА.

В режиме корректировки текстовых файлов пользователь может не только модифицировать данные как в обычном режиме, но и вносить изменения в перечень наземных пунктов, КА, а также в файлы сценариев установки.

В процессе работы получаемые промежуточные и окончательные результаты протоколируются и записываются в текстовый файл.

### *Входные данные*

Входными данными для модуля «Планировщик» являются (по выбору):

- файлы конфигурации системы, включающие в т.ч. файлы модулей «Баллистика» и «Анализ»;
- результаты расчетов проведенные с использованием модуля «Анализ»  
или
- файл выходных параметров циклограммы приема данных ДЗЗ (рисунок 5.2).

1. Файлы конфигурации данных для формирования процессов обработки  
имеют следующую структуру:

```
[params]
title=Pervichka
caption=Pervichka
CriterionToMax=0 /* критерий 0-
минимизировать 1-максимизировать
UseDLL=0
param.in.var=Vin /* идентификатор
входной переменной
param.in.title=Vvx
param.in.caption=Объем входной информации
param.out.var=result /* идентификатор
выходной переменной
param.out.title=Результат
param.out.caption=Результат расчетов
function.factor=1.000000000000000E+00 /* коэффициент
пересчета в единую систему
criterion_performance.factor=1.000000000000000E+00 /* коэффициент
пересчета в сутки !!!
criterion_cost_effectiveness.factor=1.000000000000000E+00 /* коэффициент
пересчета в единую систему

[performance]
RESURS-P-1=0.000 /* RESURS-P-1
BELKA=0.000 /* БелКА
KANOPUS-V-1=0.000 /* KANOPUS-V-1
KANOPUS-IK=0.000 /* Канопус-ИК
KANOPUS-V-3=0.000 /* Канопус-В-3
KANOPUS-V-4=0.000 /* Канопус-В-4
METEOR-M-2=0.000 /* МЕТЕОР-М-2
MOSCOW-1=1.000 /* НЦ ОМЗ
ZHELEZNOGORSK=1.000 /* Железногорск
OBNINSK=0.000 /* Обнинск
NOVOSIBIRSK=0.000 /* Новосибирск
Khabarovsk=0.000 /* Хабаровск
DOLGOPRUDNII=0.000 /* Долгопрудный
MURMANSK=0.000 /* Мурманск
KALININGRAD=0.000 /* Калининград
TSIOLKOVSKY=0.000 /* Циолковский
SAMARA=0.000 /* Самара

[cost-effectiveness]
RESURS-P-1=0.000 /* RESURS-P-1
BELKA=0.000 /* БелКА
KANOPUS-V-1=0.000 /* KANOPUS-V-1
KANOPUS-IK=0.000 /* Канопус-ИК
KANOPUS-V-3=0.000 /* Канопус-В-3
KANOPUS-V-4=0.000 /* Канопус-В-4
METEOR-M-2=0.000 /* МЕТЕОР-М-2
```

```

MOSCOW-1=4078.000 /* НЦ ОМЗ
ZHELEZNOGORSK=4078.000 /* Железногорск
OBNINSK=0.000 /* Обнинск
NOVOSIBIRSK=0.000 /* Новосибирск
Khabarovsk=0.000 /* Хабаровск
DOLGOPRUDNII=0.000 /* Долгопрудный
MURMANSK=0.000 /* Мурманск
KALININGRAD=0.000 /* Калининград
TSIOLKOVSKY=0.000 /* Циолковский
SAMARA=0.000 /* Самара

```

## [restrictions]

```

RESURS-P-1=0;0.000000000000000E+00 /* RESURS-P-1
BELKA=0;0.000000000000000E+00 /* БелКА
KANOPUS-V-1=0;0.000000000000000E+00 /* KANOPUS-V-1
KANOPUS-IK=0;0.000000000000000E+00 /* Канопус-ИК
KANOPUS-V-3=0;0.000000000000000E+00 /* Канопус-В-3
KANOPUS-V-4=0;0.000000000000000E+00 /* Канопус-В-4
METEOR-M-2=0;0.000000000000000E+00 /* МЕТЕОР-М-2
MOSCOW-1=3;0.000000000000000E+00 /* НЦ ОМЗ
ZHELEZNOGORSK=1;0.000000000000000E+00 /* Железногорск
OBNINSK=0;0.000000000000000E+00 /* Обнинск
NOVOSIBIRSK=0;0.000000000000000E+00 /* Новосибирск
Khabarovsk=0;0.000000000000000E+00 /* Хабаровск
DOLGOPRUDNII=0;0.000000000000000E+00 /* Долгопрудный
MURMANSK=0;0.000000000000000E+00 /* Мурманск
KALININGRAD=0;0.000000000000000E+00 /* Калининград
TSIOLKOVSKY=0;0.000000000000000E+00 /* Циолковский
SAMARA=0;0.000000000000000E+00 /* Самара

```

## [function]

```
result=Vin
```

## [criterion\_performance]

```
result=0.04
```

## [criterion\_cost\_effectiveness]

```
result=0.04
```

здесь:

Ключ	Описание данных
раздел [params]	
name	уникальный идентификатор (совпадает с именем каталога)
title	краткое название
caption	более детальное название

CriterionToMax	Определяет чему соответствует критериальная функция – вычислению минимума или максимума
param.out.title	краткое название входной переменной
param.out.caption	более детальное описание входной переменной
param.in.var	идентификатор входной переменной
param.out.title	краткое название выходной переменной
param.out.caption	более детальное описание выходной переменной
param.out.var	идентификатор выходной переменной
param.performance.title	краткое название коэффициента производительности
param. performance.caption	более детальное описание коэффициента производительности
param. performance.var	идентификатор коэффициента производительности

В разделах [function], [criterion], [cost] задаются способы вычисления функции преобразования, показателя эффективности и стоимости соответственно.

В программе возможны несколько вариантов задания способа вычислений:

- с помощью коэффициентов полинома (пример в приведен в разделе [function]);
- с помощью формулы (см. раздел [criterion1]);
- таблицей (см. раздел [criterion2]);
- при невозможности использовать вышеперечисленные способы, то с использованием динамически подключаемой библиотеке (DLL).

Если механизм DLL не задействован, то способ задания вычислений определяется по следующему алгоритму:

- если в разделе присутствует ключ «polynom», то выбирается первый способ;
- если в разделе присутствует ключ, совпадающий со значением param.out.var, то выбирается второй способ;
- во всех остальных случаях выбирается третий способ.

В случае ввода ошибочных данных:

- функция преобразования обнуляется;
- критериальная функция принимает бесконечно большое или бесконечно малое значение (в зависимости от флага CriterionToMax):
- стоимость принимает бесконечно большое значение

В разделе [performance] приводятся коэффициенты производительности пунктов обработки по отношению к реализации данного процесса. Отсутствие пункта в списке или нулевой коэффициент означает отсутствие возможности реализации данного процесса.

В разделе [cost-effectiveness] приводятся коэффициенты себестоимости пунктов обработки по отношению к реализации данного процесса.

В разделе [restrictions] приводятся ограничения на реализацию процесса в виде:

```
Идентификатор ППИ=Count;Volume /* комментарий
Идентификатор ППИ – уникальный идентификатор ППИ
```

Count – максимально возможное число процессов данного типа, которое может быть запущено на данном ППИ

Volume – максимально возможный объем информации процессов данного типа, который может быть запущен на данном ППИ.

## 2. Файлы конфигурации для обработки заявки имеют следующую структуру:

```
[params]
title=New_test_30_07_2018
caption=New_test_30_07_2018

[processes]
001=WORKPATH\data\dispenser\processes\Priem.process /* Priem
002=WORKPATH\data\dispenser\processes\Pervichka.process /* Pervichka
003=WORKPATH\data\dispenser\processes\Katalog.process /* Katalog
```

В разделе [params] содержится краткое и более детальное описание. В разделе [processes] указывается перечень процессов, необходимых для обработки. Порядок обработки соответствует порядку в списке.

### 3. Файлы конфигурации для формирования технологической карты имеют следующий вид:

```
[params]
start.date=30.07.2018          /* начальная дата (DD.ММ.YYYY)
start.time=00:00:00.000        /* начальное время (НН:НН:СС.ССS)
start.infamount=1.00000000000000E+01 /* начальный объем информации
start.prefer=0                  /* предпочтение (0-ПО решение, 1-время, 2-стоимость)

[results]
finish.date=30.07.2018
finish.time=02:11:56.800
finish.infamount=1.00000000000000E+01
finish.duration=9.16296296296296E-02
finish.cost=3.54786020000000E+02
finish.route=pareto;duration;cost;

[legend]
process.start=Время поступления процесса в узел обработки
waiting.stop=Время начала выполнения процесса
process.stop=Время окончания выполнения процесса
transmit.stop=Время окончания передачи данных на последующий узел обработки
input.infamount=Объем входной информации
output.infamount=Объем выходной информации
output.duration=Время выполнения
output.cost=Стоимость (обработка+передача)

[route]
process.node; process.name; process.start; waiting.stop;
process.stop; transmit.stop; input.infamount;
output.infamount; output.duration; output.cost
MOSCOW-1; Priem; 30.07.2018 00:00:00.000; 30.07.2018 00:00:00.000;
30.07.2018 00:28:48.000; 30.07.2018 00:32:08.000; 1.00000000000000E+01;
1.00000000000000E+01; 2.23148148148148E-02; 9.08200000000000E+01
MOSCOW-1; Pervichka; 30.07.2018 00:32:08.000; 30.07.2018 00:32:08.000;
30.07.2018 01:29:44.000; 30.07.2018 01:33:04.000; 1.00000000000000E+01;
1.00000000000000E+01; 4.23148148148148E-02; 1.72380000000000E+02
MOSCOW-1; Katalog; 30.07.2018 01:33:04.000; 30.07.2018 01:33:04.000;
30.07.2018 02:11:56.800; 30.07.2018 02:11:56.800; 1.00000000000000E+01;
1.00000000000000E+01; 2.70000000000000E-02; 1.10106000000000E+02

[pareto]
process.node; process.name; process.start; waiting.stop;
process.stop; transmit.stop; input.infamount;
output.infamount; output.duration; output.cost
MOSCOW-1; Priem; 30.07.2018 00:00:00.000; 30.07.2018 00:00:00.000;
30.07.2018 00:28:48.000; 30.07.2018 00:32:08.000; 1.00000000000000E+01;
1.00000000000000E+01; 2.23148148148148E-02; 9.08200000000000E+01
MOSCOW-1; Pervichka; 30.07.2018 00:32:08.000; 30.07.2018 00:32:08.000;
30.07.2018 01:29:44.000; 30.07.2018 01:33:04.000; 1.00000000000000E+01;
1.00000000000000E+01; 4.23148148148148E-02; 1.72380000000000E+02
```

```
MOSCOW-1; Katalog; 30.07.2018 01:33:04.000; 30.07.2018 01:33:04.000;
30.07.2018 02:11:56.800; 30.07.2018 02:11:56.800; 1.00000000000000E+01;
1.00000000000000E+01; 2.70000000000000E-02; 1.10106000000000E+02
```

[duration]

```
process.node; process.name; process.start; waiting.stop;
process.stop; transmit.stop; input.infamount;
output.infamount; output.duration; output.cost
MOSCOW-1; Priem; 30.07.2018 00:00:00.000; 30.07.2018 00:00:00.000;
30.07.2018 00:28:48.000; 30.07.2018 00:32:08.000; 1.00000000000000E+01;
1.00000000000000E+01; 2.23148148148148E-02; 9.08200000000000E+01
MOSCOW-1; Pervichka; 30.07.2018 00:32:08.000; 30.07.2018 00:32:08.000;
30.07.2018 01:29:44.000; 30.07.2018 01:33:04.000; 1.00000000000000E+01;
1.00000000000000E+01; 4.23148148148148E-02; 1.72380000000000E+02
MOSCOW-1; Katalog; 30.07.2018 01:33:04.000; 30.07.2018 01:33:04.000;
30.07.2018 02:11:56.800; 30.07.2018 02:11:56.800; 1.00000000000000E+01;
1.00000000000000E+01; 2.70000000000000E-02; 1.10106000000000E+02
```

[cost]

```
process.node; process.name; process.start; waiting.stop;
process.stop; transmit.stop; input.infamount;
output.infamount; output.duration; output.cost
MOSCOW-1; Priem; 30.07.2018 00:00:00.000; 30.07.2018 00:00:00.000;
30.07.2018 00:28:48.000; 30.07.2018 00:32:08.000; 1.00000000000000E+01;
1.00000000000000E+01; 2.23148148148148E-02; 9.08200000000000E+01
MOSCOW-1; Pervichka; 30.07.2018 00:32:08.000; 30.07.2018 00:32:08.000;
30.07.2018 01:29:44.000; 30.07.2018 01:33:04.000; 1.00000000000000E+01;
1.00000000000000E+01; 4.23148148148148E-02; 1.72380000000000E+02
MOSCOW-1; Katalog; 30.07.2018 01:33:04.000; 30.07.2018 01:33:04.000;
30.07.2018 02:11:56.800; 30.07.2018 02:11:56.800; 1.00000000000000E+01;
1.00000000000000E+01; 2.70000000000000E-02; 1.10106000000000E+02
```

**Для формирования входных данных используется секция [params]:**

```
start.date - начальная дата (DD.MM.YYYY)
start.time - начальное время (HH:NN:SS.SSS)
start.infamount - начальный объем информации
start.prefer - предпочтение (0-ПО решение, 1-время, 2-стоимость)
```

**Результаты текущих расчетов содержатся в секциях**

[results]:

```
finish.date - дата завершения
finish.time - время завершения
finish.infamount - объем информации на выходе
finish.duration - длительность (в сутках)
finish.cost - стоимость
finish.route - какому решению (Парето-оптимальное, минимум времени или стоимости)
соответствуют результаты в секции [route]
```

[route], [pareto], [duration], [cost] –выбранный маршрут, Парето-оптимальный маршрут, Маршрут с минимальным временем, маршрут с минимальной

стоимостью, соответственно, в виде таблицы колонки которой соответствуют расшифровкам в секции [legend]:

```
[legend]
process.start=Время поступления процесса в узел обработки
waiting.stop=Время начала выполнения процесса
process.stop=Время окончания выполнения процесса
transmit.stop=Время окончания передачи данных на последующий узел обработки
input.infamount=Объем входной информации
output.infamount=Объем выходной информации
output.duration=Время выполнения
output.cost=Стоимость (обработка+передача)
```

#### 4. Структура текстового файла пакетной обработки содержит строки вида:

```
/файл_обработки_заявки /файл_данных /автоматическая_регистрация_результатов
```

«Файл\_обработки\_заявки» - файл 2.

«Файл\_данных» - файл 3 (технологическая карта).

«Автоматическая\_регистрация\_результатов» имеет значение 1-да, 0-нет

Пример:

```
/test.script /test.data /1
```

5. Файлы регистрации результатов формируются в виде таблицы, столбцы которой соответствуют:

```
script.id=уникальный идентификатор текущего выполненного сценария
process.start=Время поступления процесса в узел обработки
waiting.stop=Время начала выполнения процесса
process.stop=Время окончания выполнения процесса
transmit.stop=Время окончания передачи данных на последующий узел обработки
input.infamount=Объем входной информации
output.infamount=Объем выходной информации
output.duration=Время выполнения
output.cost=Стоимость (обработка+передача)
```

6. Данные о пропускной способности и стоимость прохождения единицы информации по линиям связи содержатся в файле конфигурации и имеют следующий вид:

```
[links]
RESURS-P-1<->RESURS-P-1=1.000000;1.000000      /* RESURS-P-1 <-> RESURS-P-1
BELKA<->RESURS-P-1=1.000000;1.000000          /* БелКА <-> RESURS-P-1
BELKA<->BELKA=1.000000;1.000000              /* БелКА <-> БелКА
KANOPUS-V-1<->RESURS-P-1=1.000000;1.000000    /* KANOPUS-V-1 <-> RESURS-P-1
KANOPUS-V-1<->BELKA=1.000000;1.000000         /* KANOPUS-V-1 <-> БелКА
KANOPUS-V-1<->KANOPUS-V-1=1.000000;1.000000   /* KANOPUS-V-1 <-> KANOPUS-V-1
KANOPUS-ИК<->RESURS-P-1=1.000000;1.000000     /* Канопус-ИК <-> RESURS-P-1
KANOPUS-ИК<->BELKA=1.000000;1.000000         /* Канопус-ИК <-> БелКА
. . . . .
```

В разделе «links» в виде списка представлены соответственно время и стоимость (через «;») передачи единицы информации.

#### *Работа с модулем*

Модуль позволяет использовать диалоговый интерфейс и проводить вычисления для одной заявки. При наличии нескольких заявок модуль позволяет проводить вычисления в пакетном режиме. Работа с модулем начинается с описания (выбора) перечня и последовательности процессов обработки заявки (рисунок 5.17).

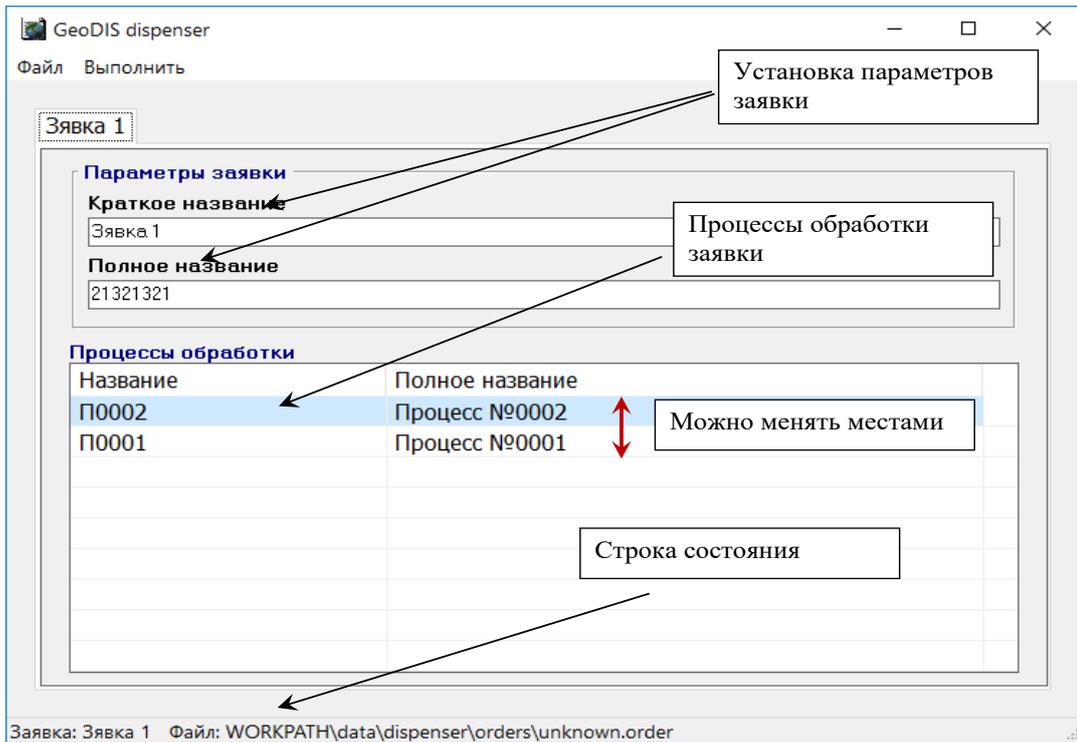


Рисунок 5.17 – Определение последовательности процессов обработки заявки

Работа с программой условно может быть разделена на этапы:

- этап корректировки исходных данных;
- этап проведения расчетов.

На этапе подготовки данных:

1. Формируется новый или используется уже созданный сценарий обработки заявки.
2. Осуществляется (при необходимости) подготовка исходных данных по процессам обработки и, для выбранного процесса, включает в себя:
  - описание процесса, а также форму и описание идентификаторов, используемых при формировании расчетных формул (рисунок 5.18);
  - конкретный способ вычисления (см. п.4.4) функции преобразования трафика, времени обработки и стоимости (рисунок 5.19);
  - определение производительности и себестоимости узлов обработки по отношению к конкретному процессу (рисунок 5.20);

- определение ограничений узлов обработки по отношению к конкретному процессу (рисунок 5.21).

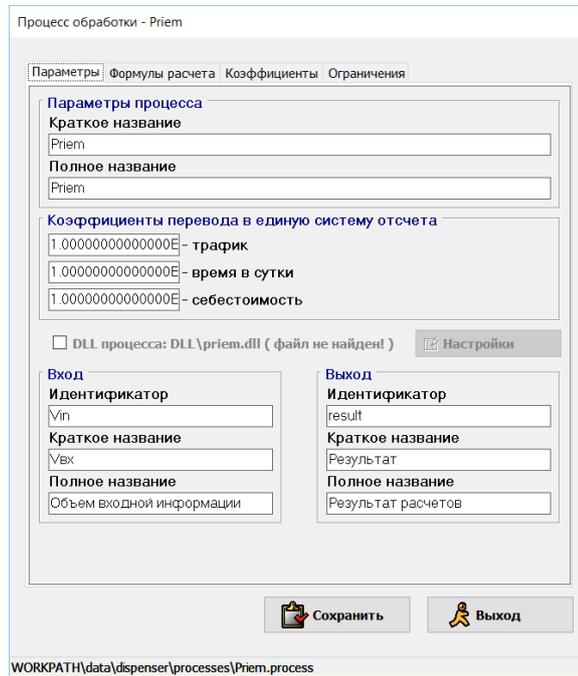


Рисунок 5.18 – Определение процесса и идентификаторов в формулах расчета  $F$ ,  $T$ ,  $C$

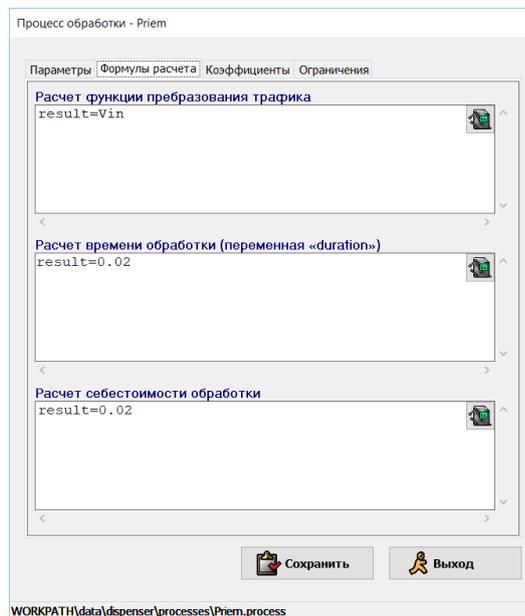


Рисунок 5.19 – Способ вычисления  $F$ ,  $T$ ,  $C$

Процесс обработки - Прием

Параметры | Формулы расчета | **Коэффициенты** | Ограничения

Производительность и себестоимость		
0	0	RESURS-P-1
0	0	БелКА
0	0	КАНОРУС-V-1
0	0	Канюче-4К
0	0	Канюче-В-3
0	0	Канюче-В-4
0	0	МЕТЕОР-M-2
1.000	4078.000	<b>ИЦ ОМЗ</b>
1.000	4078.000	<b>Железногорск</b>
0	0	Обнинск
0	0	Новосибирск
0	0	Хабаровск
0	0	Долгорудный
0	0	Мурманск
0	0	Калининград
0	0	Циолковский
0	0	Сенгера

Сохранить | Выход

WORKPATH\data\dspenser\processes\Priem.process

Рисунок 5.20 – Производительность и себестоимость узлов обработки по отношению к конкретному процессу

Процесс обработки - Прием

Параметры | Формулы расчета | Коэффициенты | **Ограничения**

Кол-во процессов и суммарный объем (вх.+вых.)		
нет	нет	RESURS-P-1
нет	нет	БелКА
нет	нет	КАНОРУС-V-1
нет	нет	Канюче-4К
нет	нет	Канюче-В-3
нет	нет	Канюче-В-4
нет	нет	МЕТЕОР-M-2
2	нет	<b>ИЦ ОМЗ</b>
2	нет	<b>Железногорск</b>
нет	нет	Обнинск
нет	нет	Новосибирск
нет	нет	Хабаровск
нет	нет	Долгорудный
нет	нет	Мурманск
нет	нет	Калининград
нет	нет	Циолковский
нет	нет	Сенгера

Сохранить | Выход

WORKPATH\data\dspenser\processes\Priem.process

Рисунок 5.21 – Определение ограничений узлов обработки по отношению к конкретному процессу

3. Действия по подготовке исходных данных по наземным пунктам и КА ОГ ДЗЗ аналогичны описанным в п. 5.2.2.

4. Проводится подготовка исходных по каналам передачи данных в форме редактирования таблицы, строки и столбцы которой соответствуют узлам обработки, а на пересечении указывается пропускная способность и стоимость канала передачи данных между узлами (рисунок 5.22).

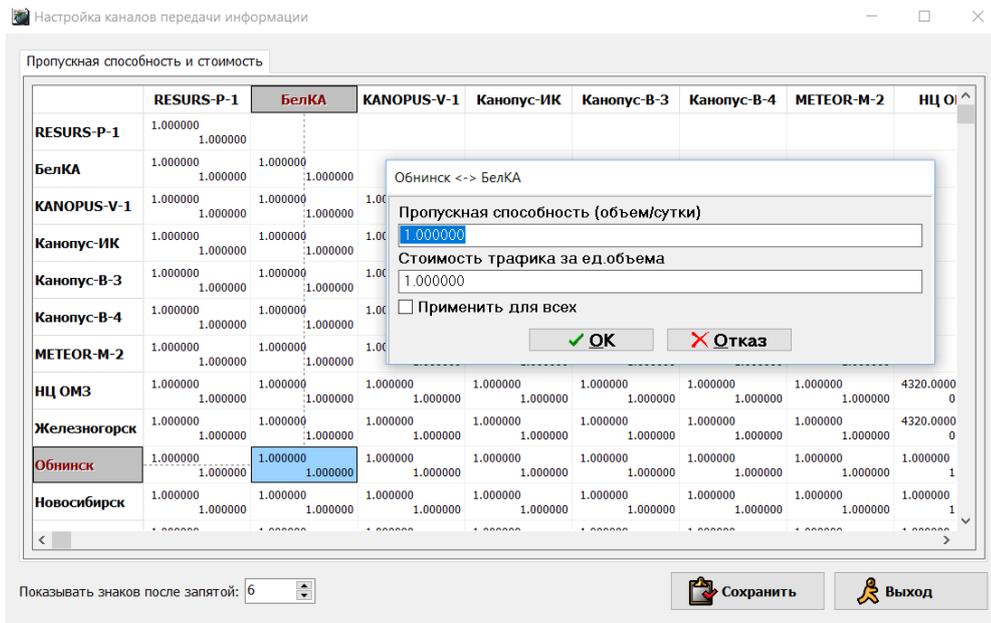


Рисунок 5.22 – Редактирование параметров линий передачи данных

При отсутствии связи в поле пропускная способность указывается 0.

На этапе выполнения расчетов пользователю имеется возможность скорректировать часть входной информации (рисунок 5.23), а именно:

- исходные данные для расчетов;
- текущие возможности выполнения процессов на ППИ.

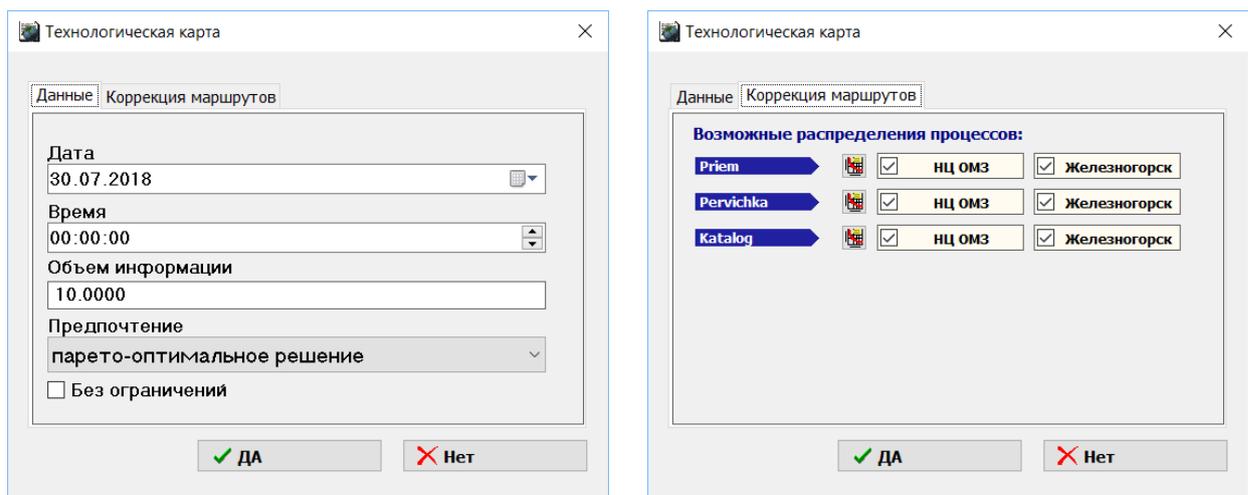


Рисунок 5.23 – Корректировка исходных данных

Модуль поддерживает функцию пакетной обработки заданий. Пакетная обработка может быть выполнена как с использованием средств самой программы, так и с помощью исполняемого текстового файла windows с расширением «.bat».

### *Выходные данные*

По завершению расчетов пользователю представляются результаты расчетов в виде следующих вариантов распределения процессов выполнения (маршрутов) (рисунок 5.24):

- соответствующего выбранному предпочтению;
- Парето-оптимальный маршрут;
- часть маршрутов, составляющие множество Парето;
- минимальный по времени маршрут;
- минимальный по стоимости маршрут;

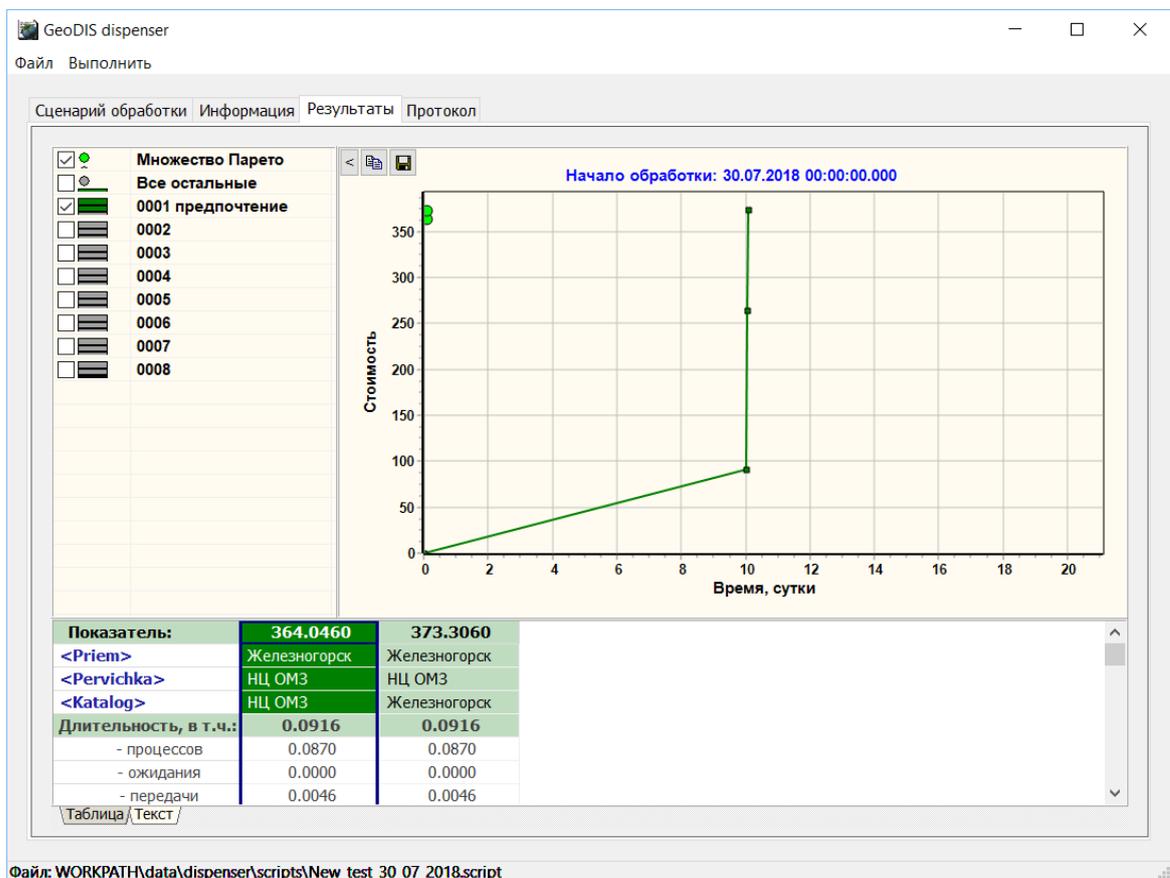


Рисунок 5.24 – Результаты расчетов

## и соответствующих им технологических картах (рисунок 5.25)

```

[params]
start.marker=                               /* маркер
start.date=17.05.2019                       /* начальная дата (DD.MM.YYYY)
start.time=01:00:00.000                     /* начальное время (HH:NN:SS.SSS)
start.infamount=1.00000000000000E+01       /* начальный объем информации
start.prefer=0                               /* предпочтение (0-по решению, 1-время, 2-стоимость)

[parser]

[results]
finish.date=26.06.2019
finish.time=15:53:59.680
finish.infamount=8.00000000000000E+01
finish.duration=4.06208296296296E+01
finish.cost=1.31491240000000E+01
finish.kind=pareto;cost;
finish.route=Moscow-1;Moscow-1;Dolgoprudnii;Moscow-1;Moscow-1;Samara
script.id=                                   /* индекс сохраненного сценария

[legend]
process.start=Время поступления процесса в узел обработки
waiting.stop=Время начала выполнения процесса
process.stop=Время окончания выполнения процесса
transmit.stop=Время окончания передачи данных на последующий узел обработки
input.infamount=Объем входной информации
output.infamount=Объем выходной информации
output.duration=Время выполнения
output.cost=Стоимость (обработка+передача)

[route]
process.node; process.name; process.start; waiting.stop; process.stop; transmit.stop; input.infamount; output.infamount;
Moscow-1; 01_Prien; 17.05.2019 01:00:00.000; 17.05.2019 01:00:00.000; 17.05.2019 01:19:52.320; 17.05.2019 01:25:12.320; 1.00000000000000E+01; 4.00000000000000E+01;
Moscow-1; Archiv_16_05; 17.05.2019 01:25:12.320; 17.05.2019 01:25:12.320; 26.06.2019 01:25:12.320; 26.06.2019 01:38:32.320; 4.00000000000000E+01; 4.00000000000000E+01;
Dolgoprudnii; Katalogiz_16_05; 26.06.2019 01:38:32.320; 26.06.2019 01:38:32.320; 26.06.2019 02:18:16.960; 26.06.2019 02:21:36.960; 4.00000000000000E+01; 1.00000000000000E+01;
Moscow-1; Obrabotka_1_16_05; 26.06.2019 02:21:36.960; 26.06.2019 02:21:36.960; 26.06.2019 04:00:58.560; 26.06.2019 04:14:18.560; 1.00000000000000E+01; 1.00000000000000E+01;
Moscow-1; 01_Prien; 26.06.2019 04:14:18.560; 26.06.2019 04:14:18.560; 26.06.2019 04:34:18.880; 26.06.2019 06:47:38.880; 1.00000000000000E+02; 4.00000000000000E+02;
Samara; Obrabotka_2_16_05; 26.06.2019 06:47:38.880; 26.06.2019 06:47:38.880; 26.06.2019 15:53:59.680; 26.06.2019 15:53:59.680; 4.00000000000000E+02; 8.00000000000000E+02;

[pareto]
process.node; process.name; process.start; waiting.stop; process.stop; transmit.stop; input.infamount; output.infamount;
Moscow-1; 01_Prien; 17.05.2019 01:00:00.000; 17.05.2019 01:00:00.000; 17.05.2019 01:19:52.320; 17.05.2019 01:25:12.320; 1.00000000000000E+01; 4.00000000000000E+01;
Moscow-1; Archiv_16_05; 17.05.2019 01:25:12.320; 17.05.2019 01:25:12.320; 26.06.2019 01:25:12.320; 26.06.2019 01:38:32.320; 4.00000000000000E+01; 4.00000000000000E+01;

```

Рисунок 5.25 – Вид технологической карты

### 5.3 Выводы по главе 5

В главе предложена методика построения и технический облик программно-моделирующего комплекса для оптимизации распределения потоков целевой информации при функционировании космической системы ДЗЗ, на основе которой разработан комплекс программ, который позволяет решать следующие задачи:

- оптимизировать распределение процессов обработки информации по заявкам потребителей, используя как скалярный (стоимость или время), так и векторный критерий (стоимость + время).
- автоматизировать формирование плана распределения обработки заявок потребителей по узлам (технологическую карту);
- проводить оценку текущего состояния инфраструктуры с точки зрения возможностей обработки заявок потребителей и выявлять возможные проблемы в будущем.

На основе проведенной декомпозиции задачи предложено в состав ПМК ввести три модуля:

Модуль «Баллистика» для проектно-баллистического анализа стабильности орбитального построения группировки спутников и определения стратегии коррекций;

Модуль «Анализ» для анализа космической системы в составе разнотипных КА и наземных ППИ в части формирования объектов съемки, определения временной последовательности возможных интервалов съемки объектов и возможных интервалов связи с ППИ, доступными по условиям радиовидимости и совместимыми по характеристикам канала радиообмена;

Модуль «Планировщик» для решения задачи оптимизации распределения процессов обработки информации по заявкам потребителей при функционировании космической системы ДЗЗ, имеющей в своем составе разнотипные КА и наземные ППИ в части формирования заявки на объекты съемки, формирования сценария обработки заявки, формирования технологической карты обработки заявки в виде временной последовательности, включающей в себя:

- интервалы съемки объектов, выделенных по типу целевой аппаратуры, принадлежащих зонам обзора КА;
- интервалы связи с ППИ, доступными по условиям взаимной радиовидимости и совместимыми по характеристикам канала радиообмена;
- распределение процессов тематической обработки спутниковой информации на элементах наземной инфраструктуры.

Главной особенностью предложенной в работе методики и технического облика программно-моделирующего комплекса является:

- возможность внешнего описания вида и параметров математических моделей расчета показателей эффективности, функции преобразования трафика и ограничений;
- возможность независимого использования модулей друг от друга;

- возможность использования модулей в пакетном режиме, что обеспечивает открытость архитектуры ПМК и позволяет внедрять их в программы других разработчиков.

Для ознакомление с возможностями ПМК представлено краткое описание всех модулей.

Предложенный подход позволяет провести выполнение всех основных этапов вычислений, а именно:

1. Моделирование динамики орбитального движения КА системы и определение «окон возможностей» по проведению съемки объектов и сеансов связи.

2. Формирование модели целевого функционирования элементов, представляющей собой модель планирования с учетом специфики сценария ее целевого функционирования и постановки оптимизационной задачи.

3. Решение оптимизационной задачи распределения целевой информации по элементам (узлам).

4. Получение и обработка результатов многократного решения задачи планирования в целях проведения системных исследований.

## **Глава 6. Результаты экспериментальной отработки распределения потоков целевой информации при функционировании космической системы ДЗЗ**

Целью экспериментальной отработки являлась проверка правильности теоретических положений и разработанной на их основе системы взаимосвязанных математических моделей, а также подтверждение способности программно-математического комплекса решать задачи оптимизации распределения потоков целевой информации при функционировании космической системы ДЗЗ.

В качестве исходных данных были использованы действующий состав и характеристики российской орбитальной группировки и наземных пунктов космической системы ДЗЗ. Детальное описание состава и технических характеристик ППИ, учитываемых при расчетах приведено в Главах 1, 5. Экспериментальная отработка состояла из:

1. Отработки задачи распределения потоков целевой информации, в качестве исходных данных для которой использованы реальные циклограммы приема данных ДЗЗ. Для определения характеристик сценариев обработки были рассчитаны коэффициенты стоимости обработки информации ДЗЗ на каждом наземном пункте из сети. Стоимость обработки космическим сегментом не учитывалась. Результаты распределения потоков информации сравнивались с аналогичными решениями Оператора системы. Для экспериментальной отработки были выбраны два наиболее модернизированные и существенно территориально удаленные ППИ, которые в дальнейшем обозначаются ППИ-1 и ППИ-2. Результаты сравнивались с реальной загруженностью этих ППИ.

2. Отработки возможности формирования ограничений на проведение съемки, связанное с необходимостью проведения коррекций. С этой целью были проведены расчеты для низких круговых, круговых, эллиптических и высокоэллиптических орбит.

## **6.1 Оптимизация распределения потоков целевой информации при функционировании космической системы ДЗЗ**

### **6.1.1 Сценарий обработки**

Сценарий работы с информацией можно разделить на несколько последовательных процессов вне зависимости от КА:

1) Прием информации происходит практически в автоматическом режиме для каждого ППИ, но, тем не менее, на случай внестатных ситуаций необходимо присутствие оператора для принятия быстрых решений. Практически на всех ППИ у операторов суточный или полусуточный (12 часов) режимы работы, и непосредственной обработкой (коррекция изображения, трансформирование, оценка и проч.) они не занимаются.

2) Первичная обработка. После приема информация поступает на первичную обработку, где проходит оценку на предмет сбоев и потерь. В ППИ-1 (единственном ППИ из всех) есть комплекс оценки качества. Режим работы – суточный в ППИ-1 и полусуточный в ППИ-2.

3) Каталогизация. Все маршруты должны пройти процедуру каталогизации, которая заключается в географической привязке маршрута, отрисовке облачности и записи в архив. Каталогизация позволяет систематизировать данные, обеспечить быстрое извлечение информации о хранимых в архиве данных, организовать поиск и выборку из архива интересующей информации по запросу пользователя. Режим работы – суточный в ППИ-1 и полусуточный в ППИ-2. На трех вышеперечисленных этапах ни в коем случае не должно быть очередей на обработку или каких-либо задержек, поэтому времена жестко регламентированы – не более 1,5 часов с момента приема маршруту до выдачи на каталогизацию.

4) Стандартная обработка. Самый трудоемкий из этапов обработки изображений – работа занимает от 30 минут до нескольких часов. В настоящее время проводится только в ППИ-1 и ППИ-2.

## 6.1.2 Расчет трафика

### Прием информации

Конкретные по приему информации получены из файлов НКПОР по всем КА. Разбиение по аппаратуре наблюдения взято отсюда же. Фрагмент файла реальных данных по интервалам времени приема информации и ее «сырой» объем от 21 марта 2018 года, Ресурс-П представлен на рисунке 5.1.

d	21.03.2018	10:44:49		10:52:49		6620	50	102	41
s	21.03.2018	4:35:45	6.875	6616	6	20.339	41		
s	21.03.2018	4:36:08	10.875	6616	7	38.165	41		
s	21.03.2018	6:10:38	6.75	6617	4	15.933	41		
s	21.03.2018	7:44:19	6.875	6618	2	5.229	41		
s	21.03.2018	9:13:57	15.625	6619	2	43.531	41		
s	21.03.2018	9:18:36	6.875	6619	3	4.137	41		
s	21.03.2018	4:36:34	8	6616	8	1.024	41		
s	21.03.2018	6:10:59	8	6617	5	1.024	41		
s	21.03.2018	7:44:38	8	6618	3	1.024	41		
s	21.03.2018	9:18:54	8	6619	4	1.024	41		
d	21.03.2018	12:18:21		12:24:59		6621	50	102	41
s	21.03.2018	4:25:51	125.875	6616	1	3.484	41		
s	21.03.2018	4:34:39	15.625	6616	5	46.777	41		
s	21.03.2018	10:43:57		13.875	6620	1	8.353	41	
s	21.03.2018	10:46:45		6.875	6620	2	19.051	41	
s	21.03.2018	10:47:33		6.875	6620	3	18.5	41	
s	21.03.2018	10:50:44		8.875	6620	4	5.413	41	
s	21.03.2018	10:53:57		8.875	6620	5	5.611	41	
s	21.03.2018	10:59:55		8	6620	8	1.024	41	
d	21.03.2018	19:54:50		19:59:53		6626	50	102	41
s	21.03.2018	12:21:01		15.625	6621	2	48.105	41	
s	21.03.2018	12:29:00		10.75	6621	4	8.348	41	
s	21.03.2018	18:50:36		7.625	6625	3	23.078	41	
s	21.03.2018	12:33:36		8	6621	6	1.024	41	
s	21.03.2018	18:50:57		8	6625	4	1.024	41	
d	21.03.2018	21:25:31		21:34:01		6627	50	102	41
s	21.03.2018	10:59:25		15.875	6620	7	46.873	41	
s	21.03.2018	12:23:06		8.75	6621	3	35.68	41	
s	21.03.2018	13:58:18		8.875	6622	1	5.383	41	

Рисунок 6.1 – Фрагмент файла приема «сырых» данных  
(от 21 марта 2018 года, Ресурс-П, ППИ-1)

Файл состоит из строк d и s.

Строка d:

- время начала сброса
- время окончания сброса
- виток
- номер включения на витке
- ППИ КА.

Строка s:

дата съемки время съемки

длительность съемки

виток номер включения на витке

объем маршрута.

Во входные текстовые файлы входит также дата и время начала обработки (т.е. дата непосредственного приема информации, а не съемки), ППИ, номер КА, начальный объем (в Гб). Отдельно необходимо отметить, что ППИ-1 обрабатывает всю информацию со всех пунктов за исключением ППИ-2.

При приеме и последующей распаковке информации объем данных увеличивается в 4 раза.

### ***Первичная обработка***

При первичной обработке объем информации практически не изменяется

### ***Каталогизация***

Каталогизация обрабатывает квиклук (Quick Look). В результате к имеющемуся объему данных добавляется маршрут, уменьшенный в 4 раза, и все это затем заносится в центральную базу данных.

### ***Стандартная обработка***

Стандартная обработка включает как цифровой анализ с применением статистических методов обработки (методы выделения признаков и классификация для количественных и качественных оценок и т. п.), так и визуальное дешифрирование, и интерпретацию. Ее могут проводить как в интерактивном, так и в автоматизированном режиме. Для этих целей разработаны различные виды программного обеспечения тематической обработки

Для стандартной обработки методика расчета аналогичная, но следует обратить внимание, что объем информации вычислялся исходя из количества

маршрутов, а не фрагментов, которые из маршрута вырезаются в ходе обработки согласно заявленным территориям.

В результате происходит увеличение/уменьшение объема информации:

$$T_{\text{стандартн.обр}} = K_{\text{стандартн.обр}} \cdot V_{\text{первичн.обр.}} \quad (6.1)$$

### **6.1.3 Расчет времени выполнения процессов**

#### ***Прием информации***

Скорость обработки составляет ~10Гбит/мин, но длительность процесса должна быть не менее 10-15 минут.

#### ***Первичная обработка***

Скорость обработки составляет ~10Гбит/мин, но длительность процесса должна быть не менее 10-15 минут.

#### ***Каталогизация***

Скорость обработки составляет ~10Гбит/мин, но длительность процесса должна быть не менее 10-15 минут.

#### ***Стандартная обработка***

Для стандартной обработки использовалась формула:

$$T_{\text{стандартн.обр}} = K T_{\text{стандартн.обр}} \cdot V_{\text{первичн.обр.}} \quad (6.2)$$

Для расчета времени, необходимого для передачи информации по линиям связи использовались информация, представленная в таблице 6.1.

Таблица 6.1 – Пропускная способность каналов связи

	НЦ ОМЗ
Железногорск	50 Мбит/с
Европейский центр НИЦ Планета	50 Мбит/с
Мурманск	50 Мбит/с
Калининград	50 Мбит/с
Восточный	50 Мбит/с
Самара	50 Мбит/с
Хруничев	1 Гбит/с

Для связки ППИ – ППИ пропускная способность не ограничена.

#### 6.1.4 Расчет стоимости обработки

При расчете стоимости в формулах п.п. 4.1.3 и 4.2.3 использовались только составляющие, связанные с затратами на оплату труда задействованных операторов:

$$C_{\text{оп}} = K_{\text{до}} * CЗП_{\text{оп}} / N_{\text{раб.дн.}} \quad (6.3)$$

где  $C_{\text{оп}}$  – Стоимость 1 часа работы оператора;

$K_{\text{до}}$  – коэффициент дополнительных отчислений (разный для разных ППИ);

$CЗП_{\text{оп}}$  – средняя заработная плата оператора на данном ППИ

$N_{\text{раб.дн.}}$  – количество рабочих дней

В результате:

- для каждого ППИ стоимость 1 часа работы оператора получилась разная, для ППИ-1 она в 1.13 раз выше, чем для ППИ-2, при этом, ППИ-1 у операторов суточный режим работы (за исключением стандартной обработки), в ППИ-2 смены по 12 часов.
- в ППИ-2 прием получился дешевле, чем в ППИ-2, поскольку там меньше зарплаты и длительность смены;
- в ППИ-1 стоимость первичной обработки в разы выше, чем в ППИ-2, в Москве первичная обработка проводится много тщательнее.

Для расчета стоимости передачи информации использовались следующая информация о стоимости каналов передачи с учетом стоимости технического обслуживания (таблица 6.2).

Таблица 6.2 – Стоимость обслуживания каналов связи

	НЦ ОМЗ
Железногорск	1000 руб./Гбит
Европейский центр НИЦ Планета	222 руб./Гбит
Мурманск	1638 руб./Гбит
Калининград	1638 руб./Гбит
Восточный	833 руб./Гбит
Самара	1333 руб./Гбит
Хруничев	1722 руб./Гбит

Для связки ППИ – ППИ стоимость единицы объема очень мала.

### 6.1.5 Ограничения

Ограничений на общий объем информации в ППИ не установлено.

Ограничения на количество выполняемых процессов на всех ППИ:

- прием информации – 10;
- первичная обработка – 1;
- каталогизация – 1;

### 6.1.6 Результаты экспериментальной отработки

При проведении экспериментальной отработки балы проведена проверка следующих функций:

- формирование исходных данных по ОГ КА ДЗЗ и НКПОР;
- формирование процессов обработки информации;
- формирование сценариев обработки информации;
- формирование политики распределения ресурсов;
- формирование пропускной способности каналов связи;
- решение задачи оптимизации распределения целевой информации с разнотипных КА ДЗЗ по составным частям космической системы ДЗЗ

## Формирование исходных данных по ОГ КА ДЗЗ и НКПОР

При формировании исходных данных по ОГ КА ДЗЗ и НКПОР происходит описание и внесение в программу их характеристик – набора ППИ, КА, приемных антенн и проч. (рисунок 6.2).

Рисунок 6.2 – Исходные данные по ОГ КА ДЗЗ и НКПОР

Основой для дальнейшей работы является формирование сценария обработки заявки, например для нашего случая это будет сценарий обработки заявки по съемке с использованием КА Ресурс-П, начиная с момента приема и заканчивая каталогизацией (рисунок 6.).

Рисунок 6.3 – Сценарий обработки данных с КА Ресурс-П

Ресурсы обработки можно распределять тремя способами – по стоимости (выбор наиболее дешевого варианта распределенной обработки), по времени

(наиболее быстрый вариант), или Парето-оптимально (наилучший выбор между стоимостью и временем).

### *Проверка адекватности математической модели*

В первую очередь была выполнена проверка на адекватность математической модели на реальных данных ППИ-1 (рисунок 6.1), которые были конвертированы в формат данных программного модуля «Планировщик» с помощью специальной утилиты. На рисунке 6.4 Представлены результаты моделирования распределения потока информации на приеме.

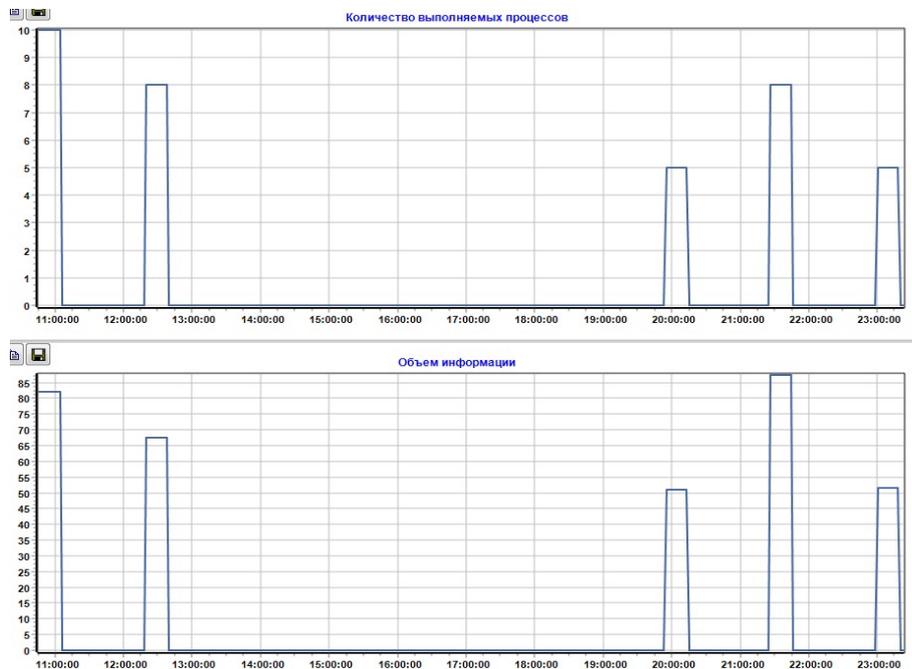


Рисунок 6.4 – Загруженность ППИ-1 при приеме информации

Четко видны два пика приема – в утренние и вечерние часы, т.к. КА «Ресурс-П» (и все остальные аппараты ОГ) находятся на солнечносинхронной орбите, поэтому в ППИ-1 именно это время и загружено.

Отметим, что на оси ординат на верхнем графике отмечено количество одновременно выполняемых процессов – для приема это 10 маршрутов, поскольку формально ограничение на количество одновременно принимаемых маршрутов нет, но сбрасывают обычно не больше 10 за один раз (это ограничение применимо

ко всем ППИ). Также можно увидеть и объем информации – утром было принято 83 Гб информации и 68 Гб соответственно (график снизу). Цифры представлены с учетом распаковки информации и увеличения ее количества в четыре раза, как и было заложено в сценарии.

Далее принимаемый поток передается на комплекс первичной обработки, где оценивается ее качество (рисунок 6.5).

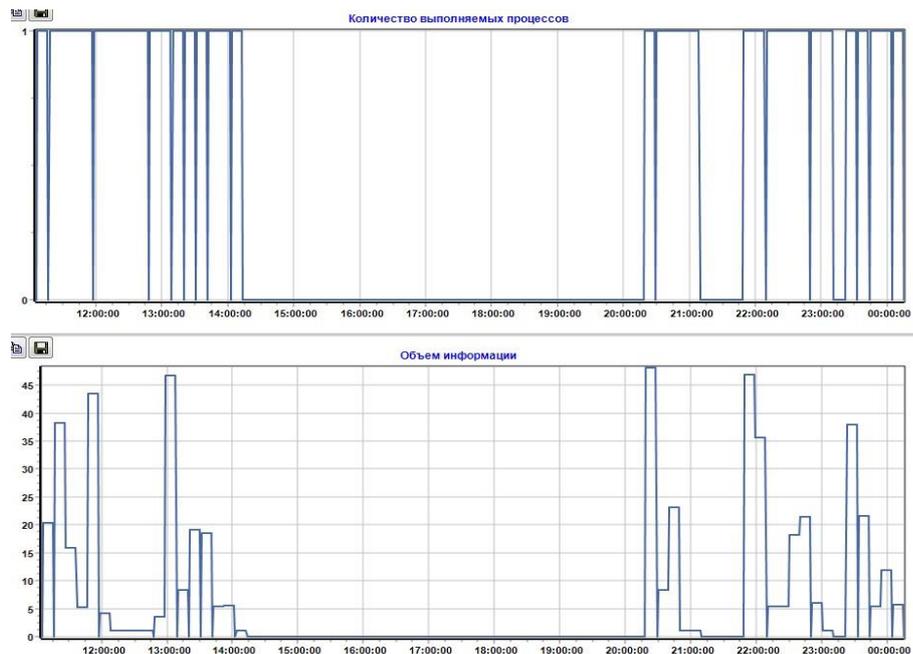


Рисунок 6.5 – Загруженность ППИ-1 при первичной обработке информации

Четко видно, что оператор на первичной обработке так же наиболее загружен в утренние и вечерние часы, но только после того, как закончился прием. Первый пик приема закончился в 11:07, и вся информация ушла на первичную обработку.

После первичной обработки каждый маршрут уходит на каталогизацию (рисунок 6.6).

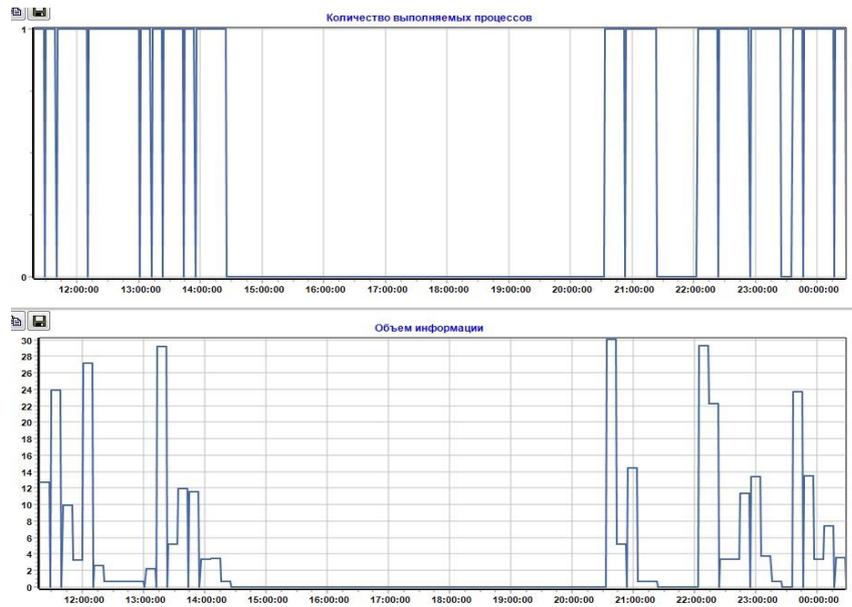


Рисунок 6.6 – Загруженность ППИ-1 при каталогизации информации

Утренний поток информации полностью закаталогизирован к половине третьего, ночной – к половине первого ночи.

Все вышеперечисленные результаты совпадают с реальными временами работы операторов, что говорит об адекватности математической модели.

Следующим этапом отработки программы является проверка на двух выбранных ППИ.

В ППИ-2, как и в ППИ-1, есть полный цикл обработки информации. Отличие заключается в том, что в ППИ-2 работает гораздо меньше людей по сравнению с ППИ-1, и один человек занимается и первичной обработкой, и каталогизацией, следовательно, его производительность работы не равна единице, как в ППИ-1.

Для отработки во входные данные добавлен прием на ППИ-2 и проведена обработка с выбором Парето-оптимального решения (рисунок 6.7).

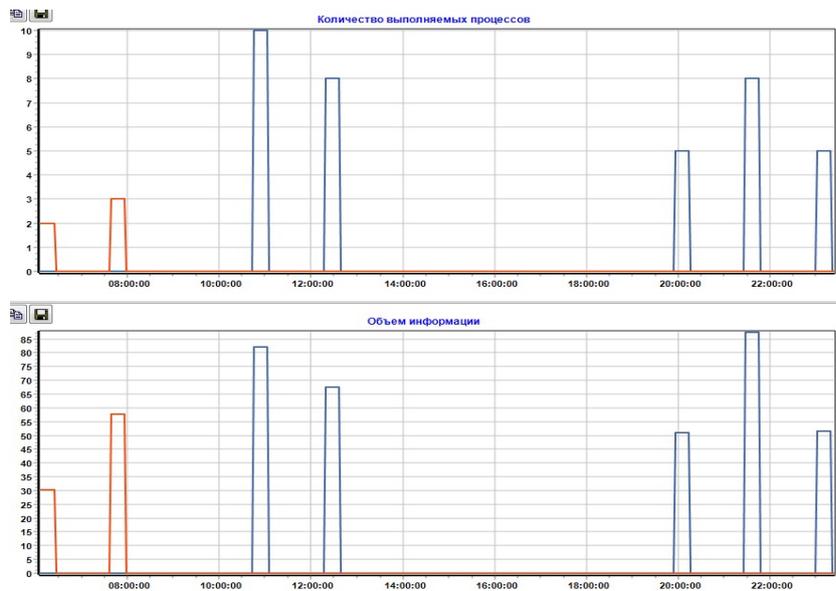


Рисунок 6.7 – Загруженность ППИ-1 и ППИ-2 при приеме информации

Синие линии – ППИ-1, красные – ППИ-2. Четко виден прием в ППИ-2 утром – сначала два маршрута, потом три.

На рисунке 6. показан вариант распределения первичной обработки между двумя ППИ.

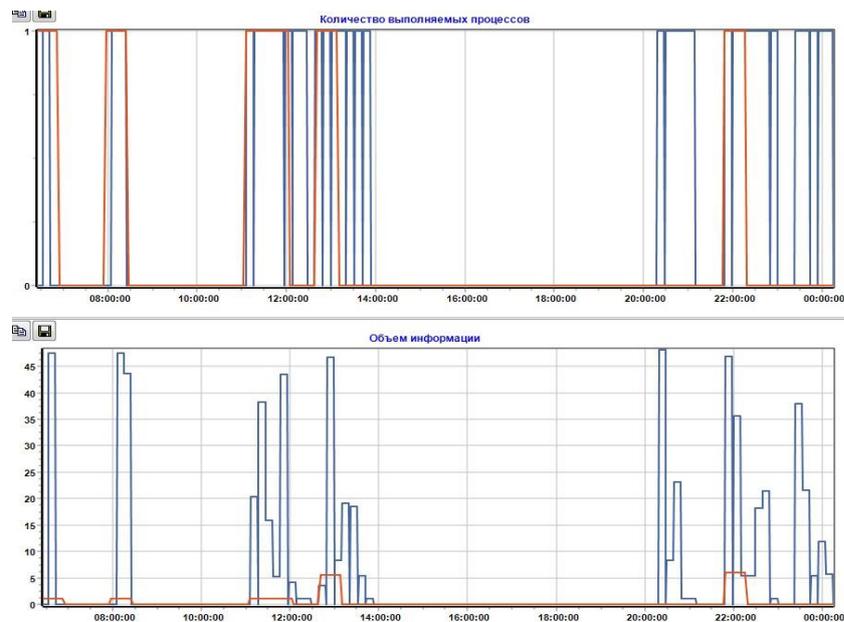


Рисунок 6.8 – Распределение первичной обработки между ППИ-1 и ППИ-2 (Парето-оптимальное решение)

*Выявленное отличие от действий Оператора системы, приводящее к улучшению показателей эффективности:*

Можно отметить адекватное поставленным условиям поведение математической модели: то, что принято в ППИ-2, остается на дальнейшую обработку там, плюс добавляется часть маршрутов, принятых в ППИ-1, поскольку в нем наблюдается большая загруженность, в то время как после утреннего приема ППИ-2 больше информации не принимает.

На рисунке 6.9 показано распределение процессов каталогизации в ППИ-1 и ППИ-2.

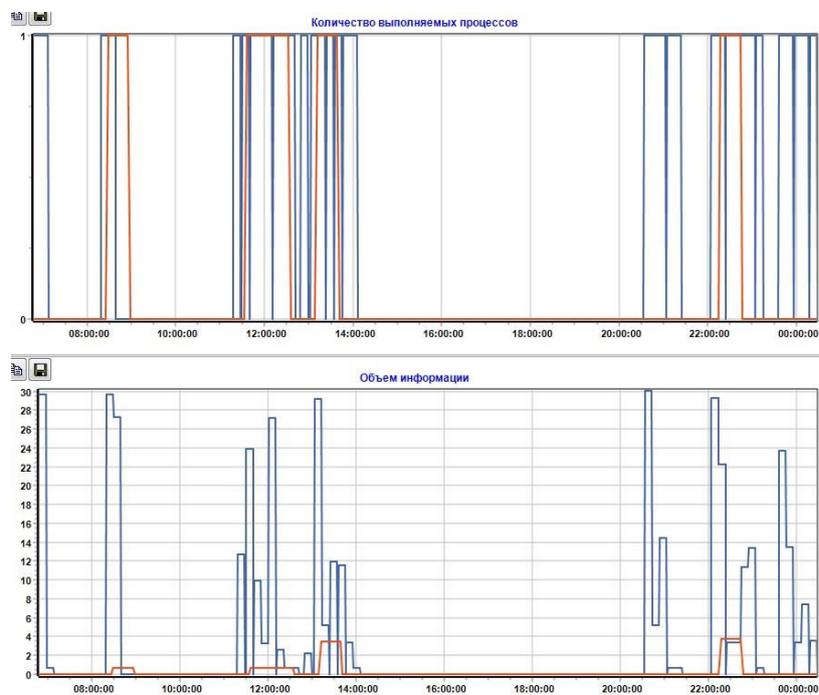


Рисунок 6.9 – Распределение процесса каталогизации между ППИ-1 и ППИ-2 (Парето-оптимальное решение)

Из рисунка видно, что после первичной обработки в результате применения модели данные не были отданы на другой ППИ. Это подтверждается реальным фактом - первичная обработка в ППИ-1 21 марта 2018 года была загружена сильнее, чем в ППИ-2 (в ППИ-2 принято всего 5 маршрутов за весь день, в то время как в ППИ-2 – 18 только до полудня).

Далее была проведена обработка по скалярному критерию «Время». На рисунках 6.10, 6.11 показано распределение процессов первичной обработки и каталогизации.

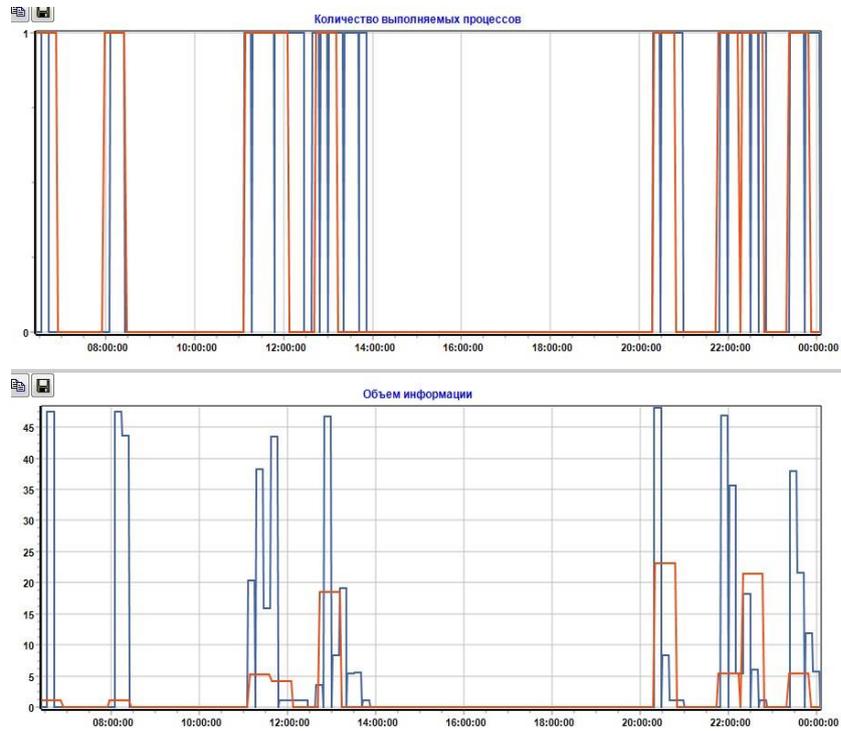


Рисунок 6.10 – Распределение первичной обработки между ППИ-1 и ППИ-2 (минимизация времени)

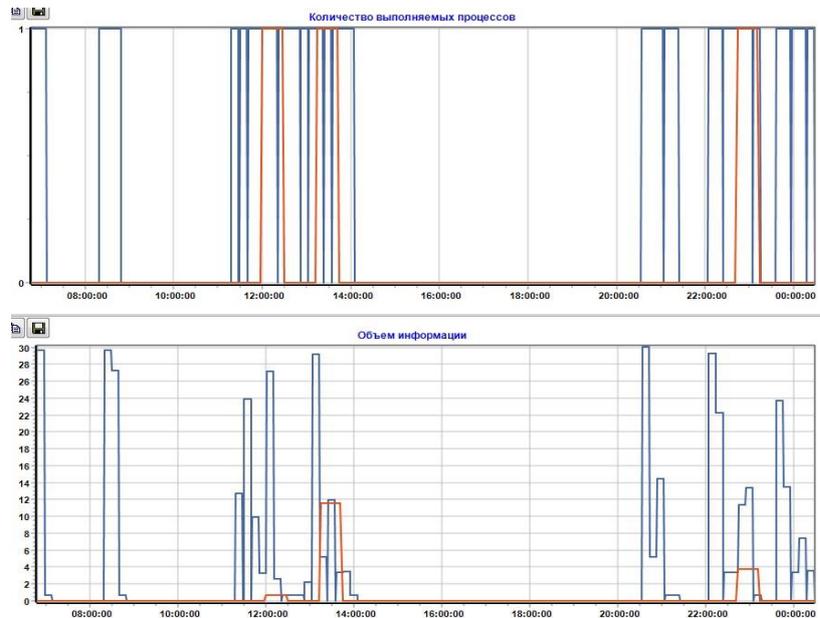


Рисунок 6.11 – Распределение процесса каталогизации между ППИ-1 и ППИ-2 (минимизация времени)

*Выявленное отличие от действий Оператора системы, приводящее к улучшению показателя эффективности:*

Здесь можно видеть то, что полученное решение дает лучший эффект по сравнению с тем, что происходило в реальности. А именно: для минимизации времени нужно гораздо большее число маршрутов обрабатывать в ППИ-2, потому что ППИ-1 сильно загружен. Утренняя первичная обработка в ППИ-2 пришла в ППИ-1, загруженный вечер в ППИ-1 ушел на ППИ-2.

Далее была проведена обработка по скалярному критерию «Стоимость». На рисунках 6.12, 6.13 показано распределение процессов первичной обработки и каталогизации.

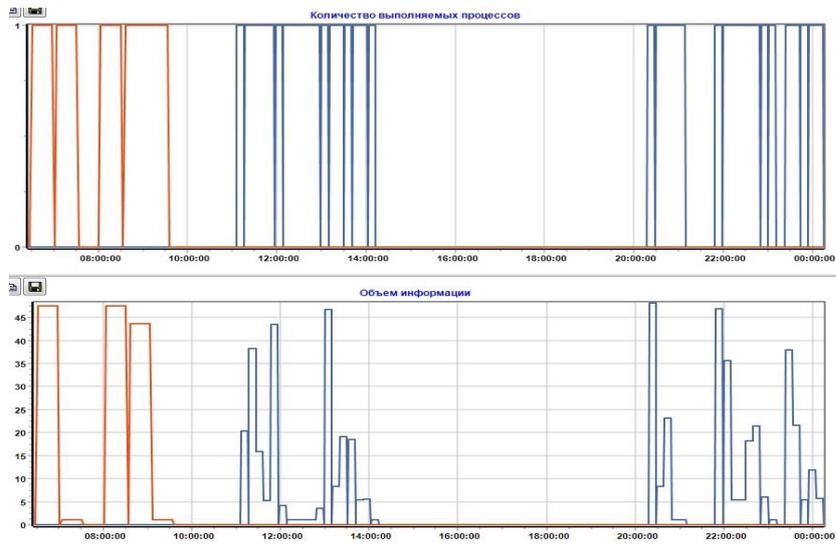


Рисунок 6.12 – Распределение первичной обработки между ППИ-1 и ППИ-2 (минимизация стоимости)

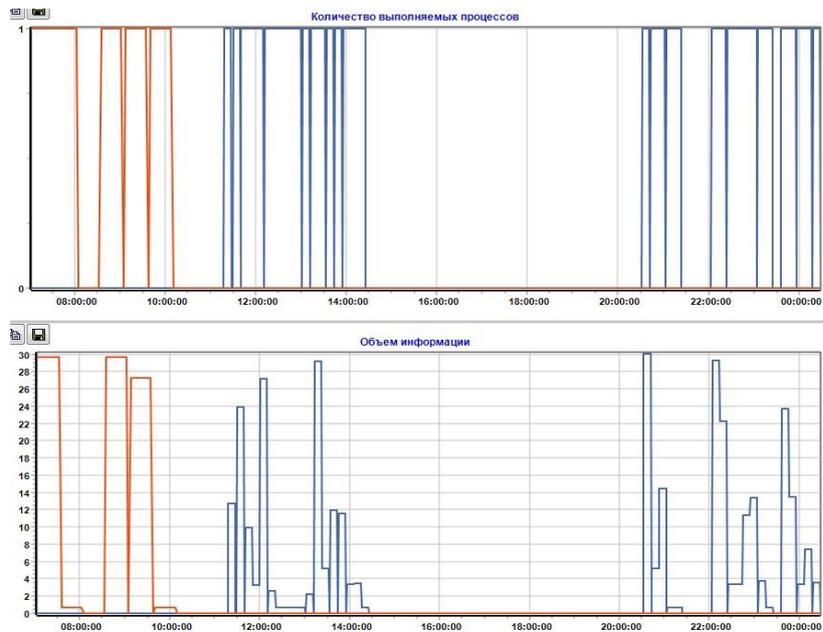


Рисунок 6.13 – Распределение процесса каталогизации между ППИ-1 и ППИ-2 (минимизация стоимости)

Результат говорит о том, что при выбранных исходных данных модели расчета стоимости, для ее минимизации необходимо принятые данные оставлять на том же ППИ без перемещения.

В заключении рассмотрим результаты оптимизации распределения обработки на всех работающих ППИ сети ЕТРИС по Парето-оптимальному решению. Отметим, что полный цикл обработки есть только в ППИ-1 и ППИ-2, а на всех остальных ППИ осуществляется только прием.

На рисунке 6.14 отображен реальный прием информации на все ППИ с КА «Ресурс-П» за двое суток – 1 и 2 февраля 2018 года.

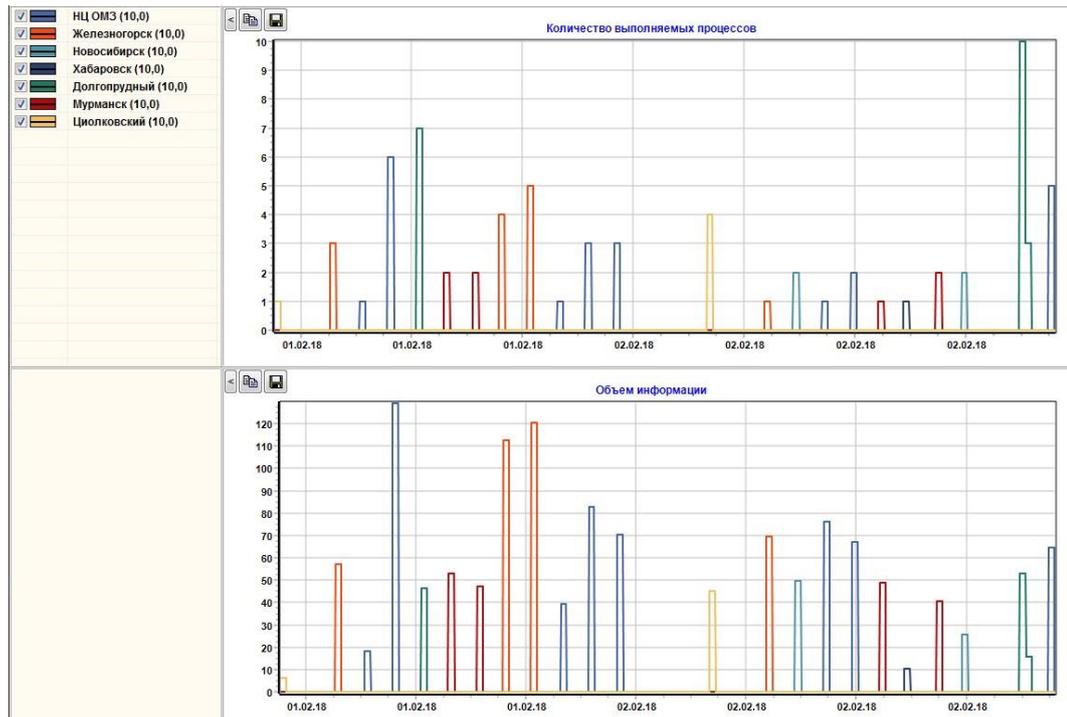


Рисунок 6.14 – Реальный прием информации с КА «Ресурс-П»  
на ППИ ЕТРИС ДЗЗ

Далее происходит перераспределение информации по ППИ (рисунки 6. И 6)

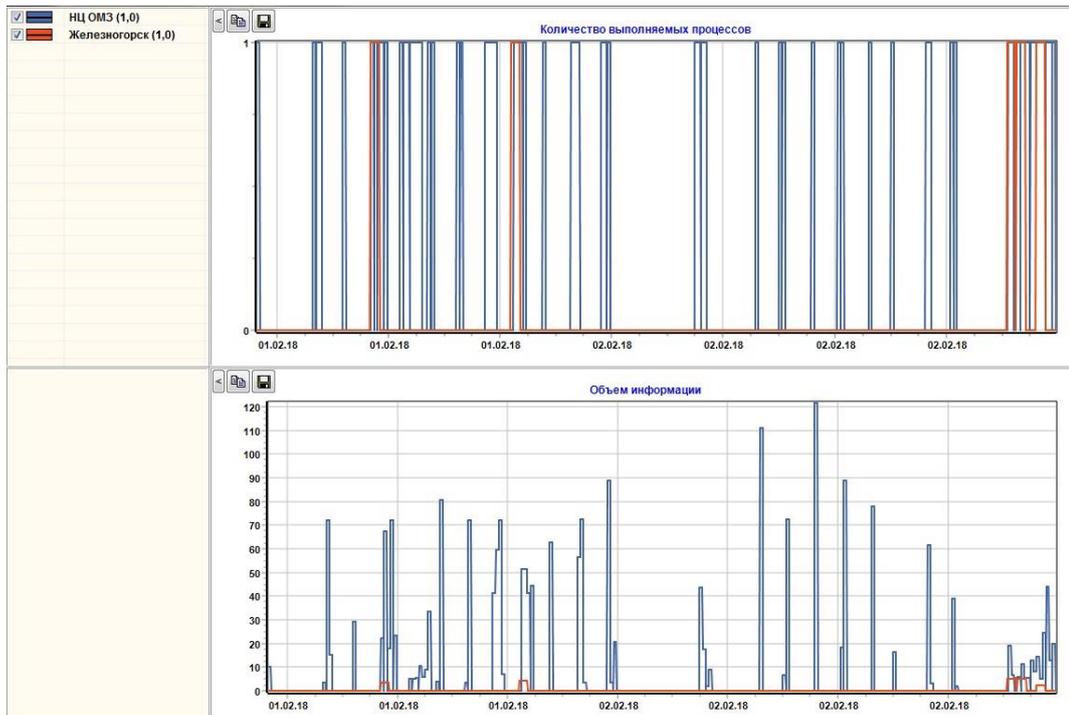


Рисунок 6.15 – Распределение первичной обработки между ППИ-1 и ППИ-2 (Парето-оптимальное решение)

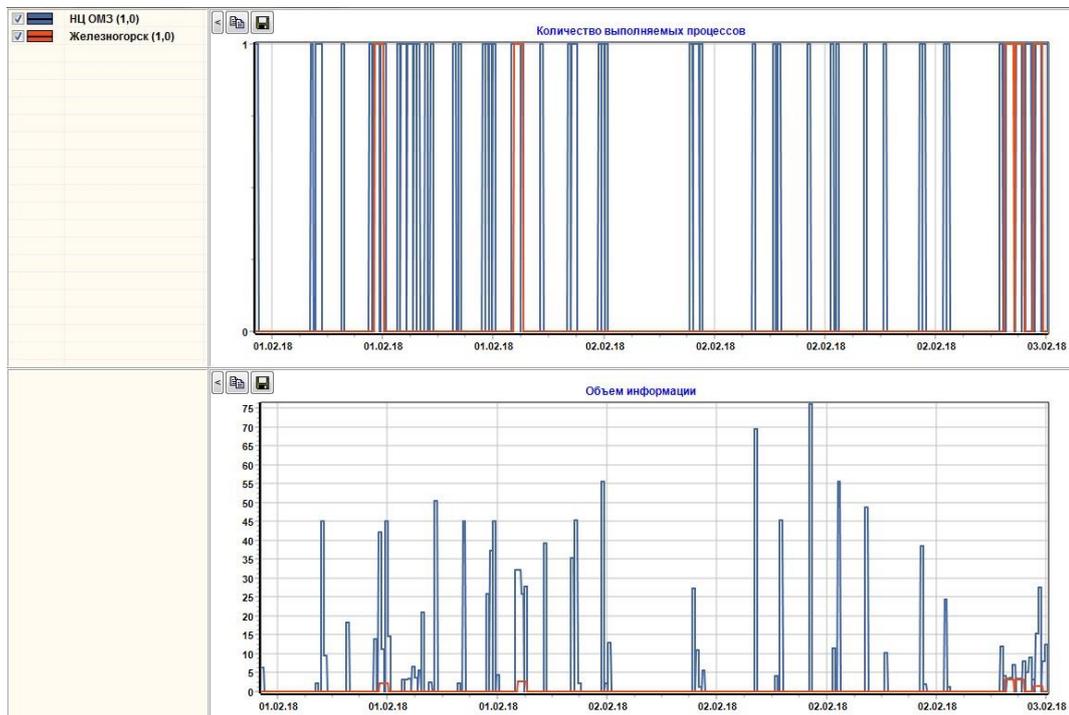


Рисунок 6.16 – Распределение процесса каталогизации между ППИ-1 и ППИ-2 (Парето-оптимальное решение)

*Выявленное отличие от действий Оператора системы, приводящее к улучшению показателей эффективности:*

Как видно из рисунков – результат улучшается за счет того, что основная часть информации переходит для дальнейшей обработки в ППИ-1, а ППИ-2 «страхует» ППИ-1, когда Оператор сильно загружен.

Далее был проведен эксперимент, когда все маршруты со всех ППИ отправляются в ППИ-1, где есть возможность одновременного быстрого выполнения большого числа процессов (прием информации не меняется, рисунок 6.14). Под «быстрым выполнением» подразумеваются следующие цифры: первичная обработка – 5 минут, каталогизация – 5 минут. Такой сценарий соответствует перспективной технологии обработки данных, внедряемой в ЕТРИС ДЗЗ. На рисунках 6.17 и 6.18 представлена модель реализации этой технологии.

При этом, в сценарии обработки было установлено ограничение на число одновременно выполняемых процессов в 100. Как можно заметить из рисунков 6.17, 6.18, максимальное количество одновременно выполняемых процессов 10, больше не требуется. Таким образом, очередь не образуется, весь объем полученной информации успевает обработаться в одном ППИ (рисунок 6.19).

Здесь и далее происходил поиск Парето-оптимального решения.

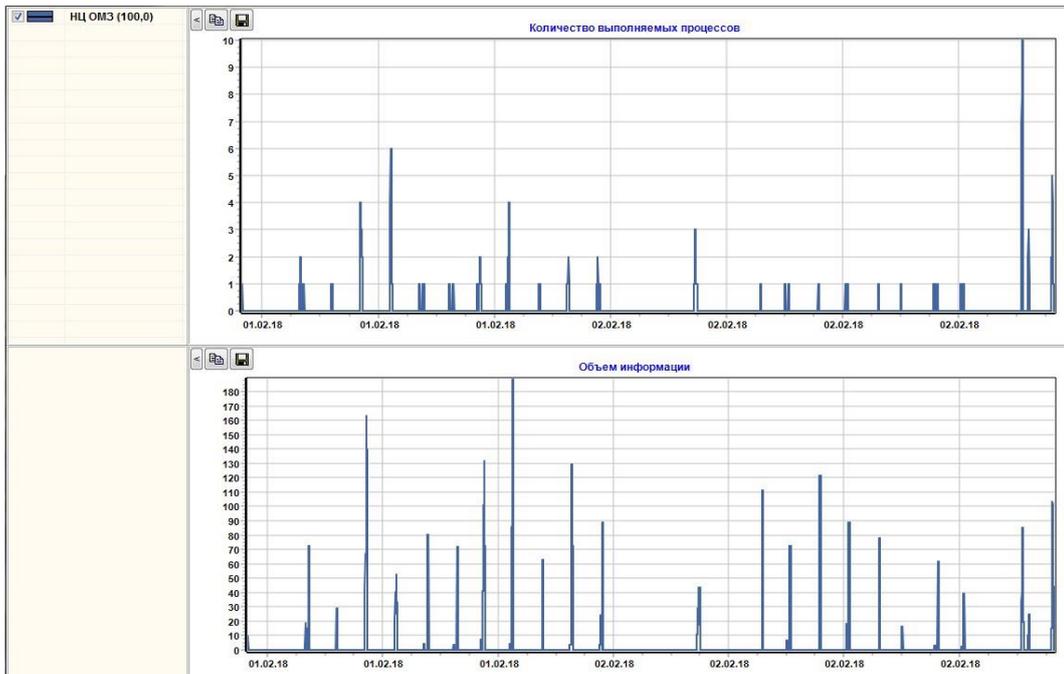


Рисунок 6.17 – Первичная обработка в ППИ-1 в условиях большого количества одновременно выполняемых процессов

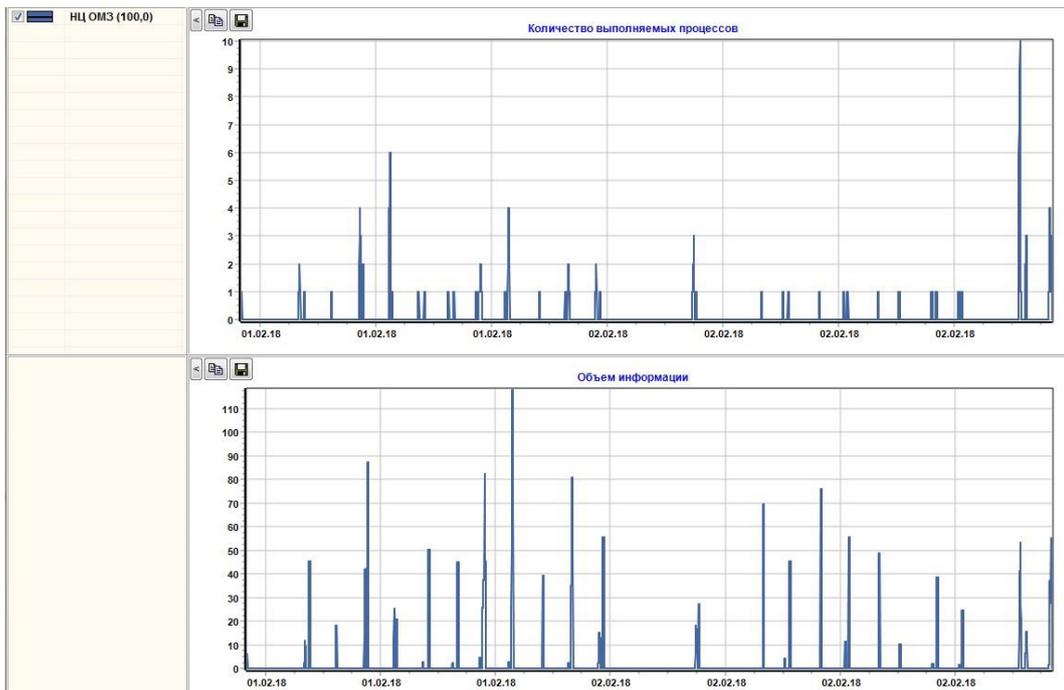


Рисунок 6.18 – Каталогизация в ППИ-1 в условиях большого количества одновременно выполняемых процессов

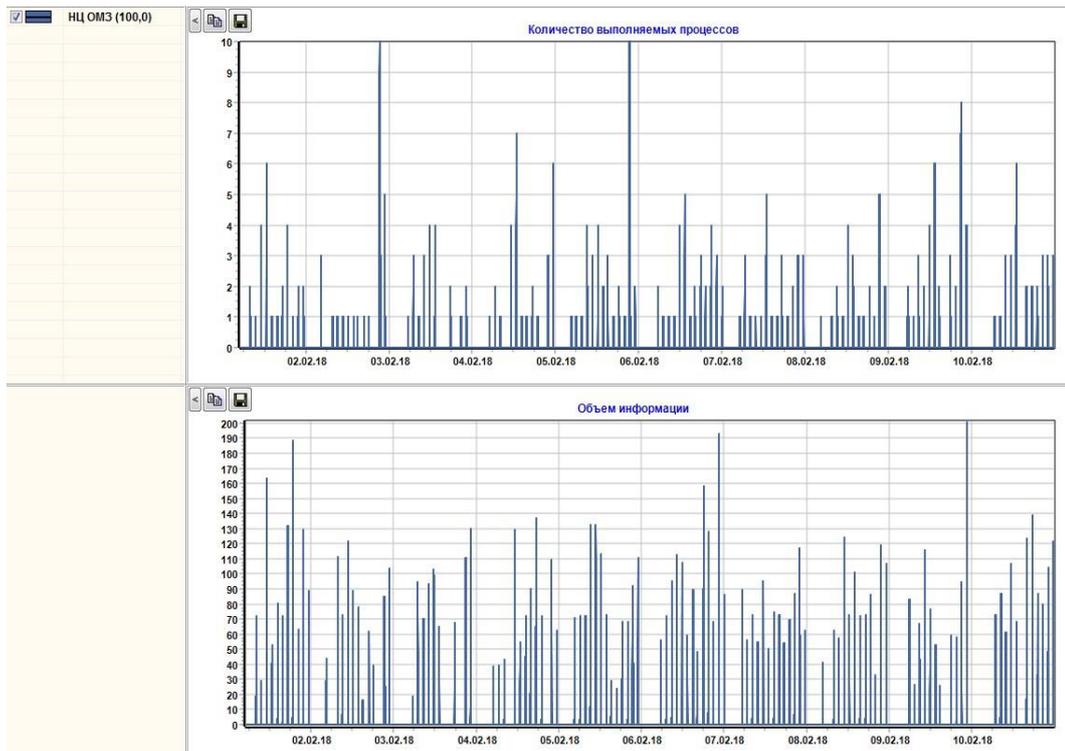


Рисунок 6.19 – Первичная обработка в ППИ-1 в условиях большого количества одновременно выполняемых процессов (10 дней)

Обратим внимание на объем информации (рисунки 6.17 – 6.19). Можно уверенно сделать вывод о том, что при подобной обработке придется значительно расширять объемы архивов. Однако стоимость обработки существенно снижается за счет сокращения ручного труда операторов различных ППИ.

Следующим этапом экспериментальной отработки являлось исследование заявки по стандартной обработке. Здесь и далее происходил поиск Парето-оптимального решения. Проверка расчета процессов стандартной обработки была выполнена по следующему сценарию:

- от комплекса работы с потребителем приходит на комплекс стандартной обработки задание на стандартную обработку вида: дата задания – время задания – уровень обработки – интересующая площадь – аппаратура – КА – маршрут – виток.
- от комплекса стандартной обработки посылается запрос в архив на выкачку маршрута.

Поскольку в настоящий момент очередь на стандартную обработку, к примеру, данных Канопус-В, составляет примерно 5 000 заданий, то запрос на выкачку из архива адресован не оперативному архиву, где принятые с ПШИ маршруты хранятся примерно месяц, а в долговременный ленточный архив, где маршруты хранятся бессрочно. Но если выкачка данных из оперативного архива не составляет проблем, то на выкачку из долговременного архива есть ограничения, так называемое «бутылочное горлышко» - не более четырех маршрутов одновременно для Ресурс-П и не более двух для Канопус-В. В условиях большого числа заявок на обработку это становится большой проблемой и увеличивает время выполнения заказа. Без очереди маршрут средних размеров выкачивается за 15 минут.

В отличие от текущего регламента работы использование разработанного ПМК позволило определить возможные проблемы в будущем при существенном увеличении количества заявок на стандартную обработку.

После успешной выкачки из архива маршрут поступает на комплекс стандартной обработки, где из него вырезают необходимую для выполнения заказа площадь. Обычно это составляет 20% от всего маршрута и, как показывается практика, чаще всего для обработки заказывают уровень 2А, для которого есть четкие регламенты по времени выполнения. Ограничения на одновременное число выполняемых заявок равно числу людей и автоматизированных рабочих мест – 28 для Ресурс-П и 16 для Канопус-В (в сумме по всем аппаратам).

В качестве исходных данных использовались задания на стандартную обработку за два числа 5 – 6 марта 2018 года в условиях отсутствия очереди. На рисунке 6.20 показана загрузка маршрутов из долговременного архива.

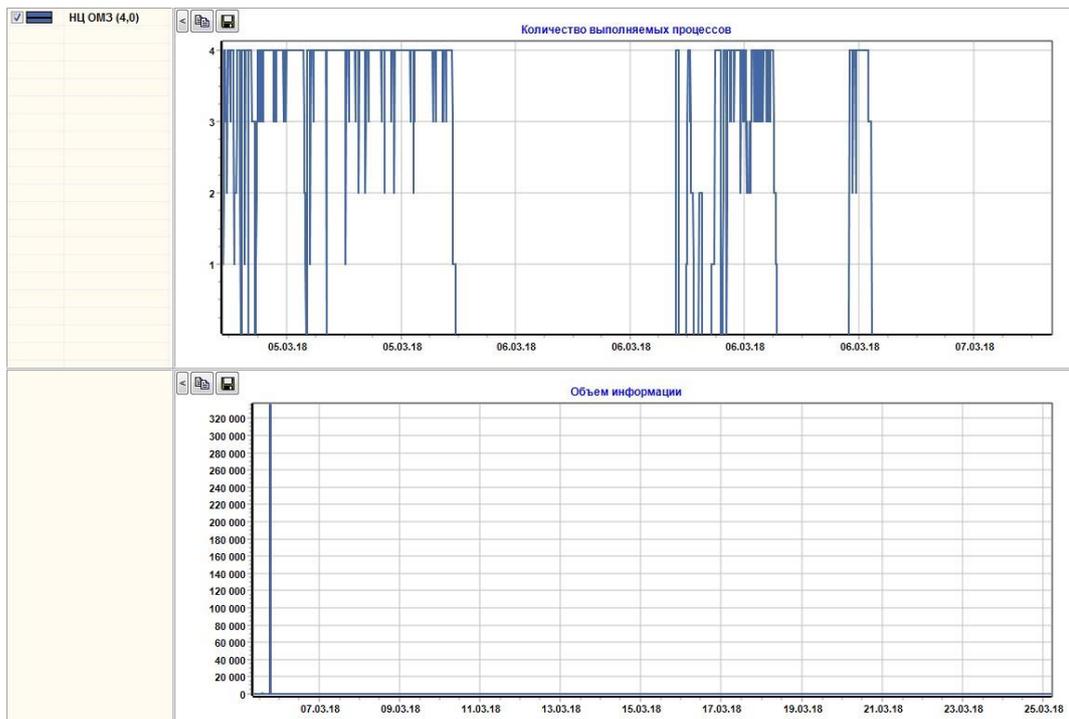


Рисунок 6.20 – Загрузка информации из долговременного архива согласно заданиям на стандартную обработку

В условиях большого числа запросов картинка неинформативна, поэтому на рисунке 6.21 представлен фрагмент результирующего файла технологической карты, который автоматически формируется модулем «Планировщик».

script.id	process.start	waiting.stop	process.stop	transmit.stop	input.infamou
6741	05.03.2018 08:37:38.000	05.03.2018 08:37:38.000	05.03.2018 08:47:34.160	05.03.2018 08:47:35.538	1.38E-01
6742	05.03.2018 08:42:36.000	05.03.2018 08:42:36.000	05.03.2018 08:52:32.160	05.03.2018 08:52:33.482	1.32E-01
6743	05.03.2018 08:43:06.000	05.03.2018 08:43:06.000	05.03.2018 08:53:02.160	05.03.2018 08:53:02.597	4.37E-02
6744	05.03.2018 08:43:32.000	05.03.2018 08:43:32.000	05.03.2018 08:53:28.160	05.03.2018 08:53:31.205	3.05E-01
6745	05.03.2018 08:43:44.000	05.03.2018 08:47:42.464	05.03.2018 08:57:38.624	05.03.2018 08:57:39.653	1.03E-01
6746	05.03.2018 08:43:51.000	05.03.2018 08:52:47.544	05.03.2018 09:02:43.704	05.03.2018 09:02:45.191	1.49E-01
6747	05.03.2018 08:44:03.000	05.03.2018 08:53:59.160	05.03.2018 09:03:55.320	05.03.2018 09:03:55.819	4.99E-02
6748	05.03.2018 08:44:09.000	05.03.2018 08:54:05.160	05.03.2018 09:04:01.320	05.03.2018 09:04:05.564	4.24E-01
6749	05.03.2018 08:44:27.000	05.03.2018 08:58:21.624	05.03.2018 09:08:17.784	05.03.2018 09:08:19.201	1.42E-01
6750	05.03.2018 08:44:33.000	05.03.2018 09:03:25.704	05.03.2018 09:13:21.864	05.03.2018 09:13:25.193	3.33E-01
6751	05.03.2018 08:44:43.000	05.03.2018 09:04:35.320	05.03.2018 09:14:31.480	05.03.2018 09:14:32.594	1.11E-01
6752	05.03.2018 08:47:38.000	05.03.2018 09:04:31.472	05.03.2018 09:14:27.632	05.03.2018 09:14:30.804	3.17E-01
6753	05.03.2018 08:47:49.000	05.03.2018 09:08:40.936	05.03.2018 09:18:37.096	05.03.2018 09:18:38.173	1.08E-01
6754	05.03.2018 08:48:46.000	05.03.2018 09:13:36.400	05.03.2018 09:23:32.560	05.03.2018 09:23:35.415	2.85E-01
6755	05.03.2018 08:48:54.000	05.03.2018 09:14:44.016	05.03.2018 09:24:40.176	05.03.2018 09:24:41.145	9.69E-02
6756	05.03.2018 08:52:03.000	05.03.2018 09:14:54.168	05.03.2018 09:24:50.328	05.03.2018 09:24:53.735	3.41E-01
6757	05.03.2018 08:52:13.000	05.03.2018 09:19:02.632	05.03.2018 09:28:58.792	05.03.2018 09:28:59.936	1.14E-01
6758	05.03.2018 08:53:31.000	05.03.2018 09:24:19.096	05.03.2018 09:34:15.256	05.03.2018 09:34:15.500	2.44E-02
6759	05.03.2018 08:53:45.000	05.03.2018 09:25:32.712	05.03.2018 09:35:28.872	05.03.2018 09:36:06.861	3.80E+00
6760	05.03.2018 08:53:45.000	05.03.2018 09:25:32.712	05.03.2018 09:35:28.872	05.03.2018 09:36:07.229	3.84E+00
6761	05.03.2018 08:54:12.000	05.03.2018 09:29:58.176	05.03.2018 09:39:54.336	05.03.2018 09:39:57.589	3.25E-01
6762	05.03.2018 08:54:35.000	05.03.2018 09:34:19.640	05.03.2018 09:44:15.800	05.03.2018 09:44:17.257	1.46E-01

Рисунок 6.21 – Фрагмент файла технологической карты

Первый столбец – id-идентификатор процесса, который не меняется в ходе дальнейшей обработки. Process.start – дата и время начала работы, waiting.stop – ожидание в очереди на обработку, process.stop–дата и время окончания работы, transmit.stop–дата и время окончания передачи файла дальше по технологической цепи на следующий этап обработки, input.infamount–начальный объем (в Гб).

Файл может быть обработан и представлен в виде очереди на загрузку данных из долговременного архива (рисунки 6.22 и 6.23).

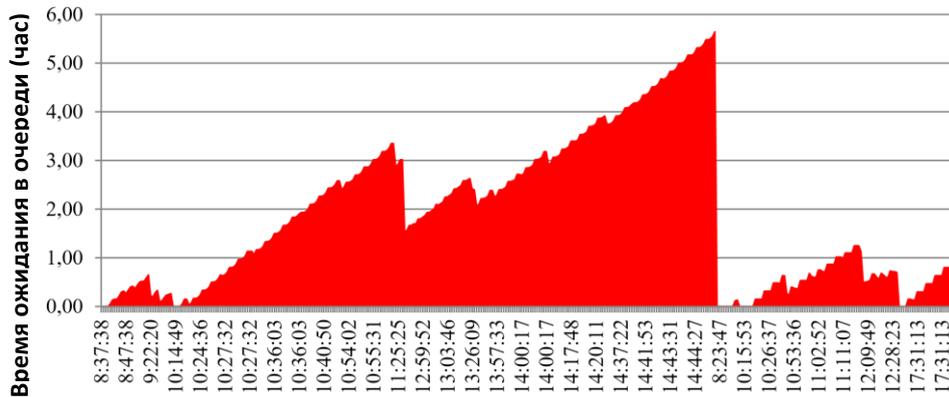


Рисунок 6.22 – Очередь на загрузку маршрутов  
из долговременного архива (один день)

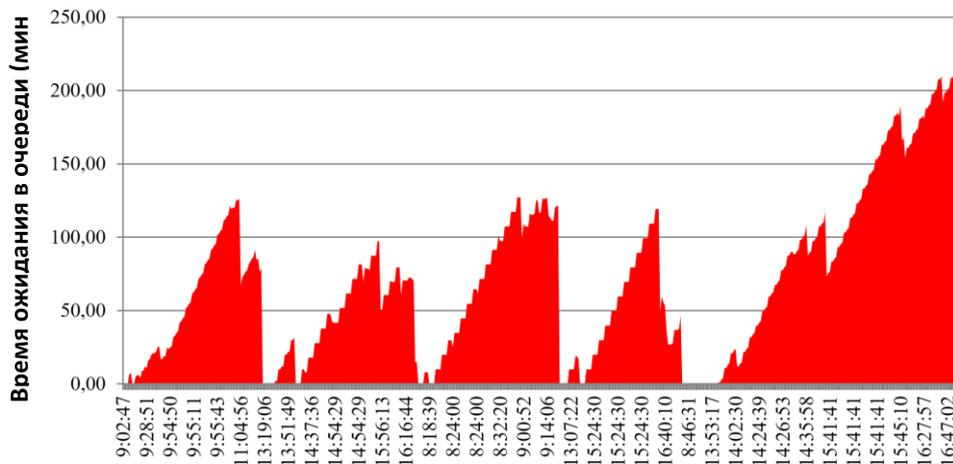


Рисунок 6.23 – Очередь на загрузку маршрутов  
из долговременного архива (три дня)

На рисунках 6.22 и 6.23 ось абсцисс – время запроса, ось ординат – время ожидания на выполнение. Таким образом, мы видим, что наблюдается «пилообразный» рост очереди, достигающий своего пика примерно к трем часам.

Из-за очереди на выгрузку из долговременного архива наблюдается отсутствие очереди на стандартную обработку (рисунок 6.24). Кроме того, немаловажен факт большого числа одновременно запущенных процессов – 28 штук.

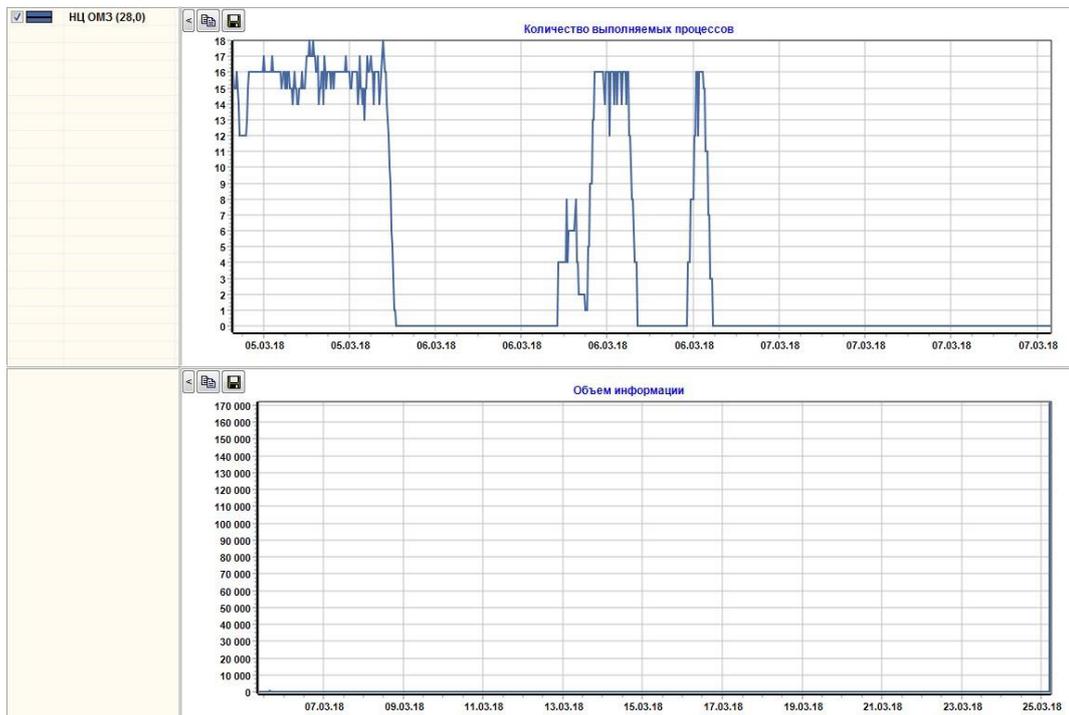


Рисунок 6.24 – Распределенная во времени стандартная обработка

Необходимо отметить, что представленные результаты не учитывают режим работы операторов (окончание рабочего дня в 17:30) и поэтому «вечерние» маршруты не «уходят» на следующий рабочий день.

Далее исследуем следующий сценарий стандартной обработки когда долговременный архив находится в ППИ-1, а обработка может происходить не только у в ППИ-1, но и еще в ППИ-2, то есть при поступлении заявки маршрут выкачивается из долговременного архива, а потом, при необходимости, передается в ППИ-2 при одновременном числе выполняемых процессов стандартной

обработки – 1. Для простоты анализа взят небольшой промежуток времени в 1,5 суток

На рисунке 6.25 показана загрузка информации из долговременного архива согласно заданиям на стандартную обработку от 22 и половины 23 марта 2018 года. В данном случае целенаправленно был взят небольшой промежуток времени в 1,5 суток для простоты анализа.

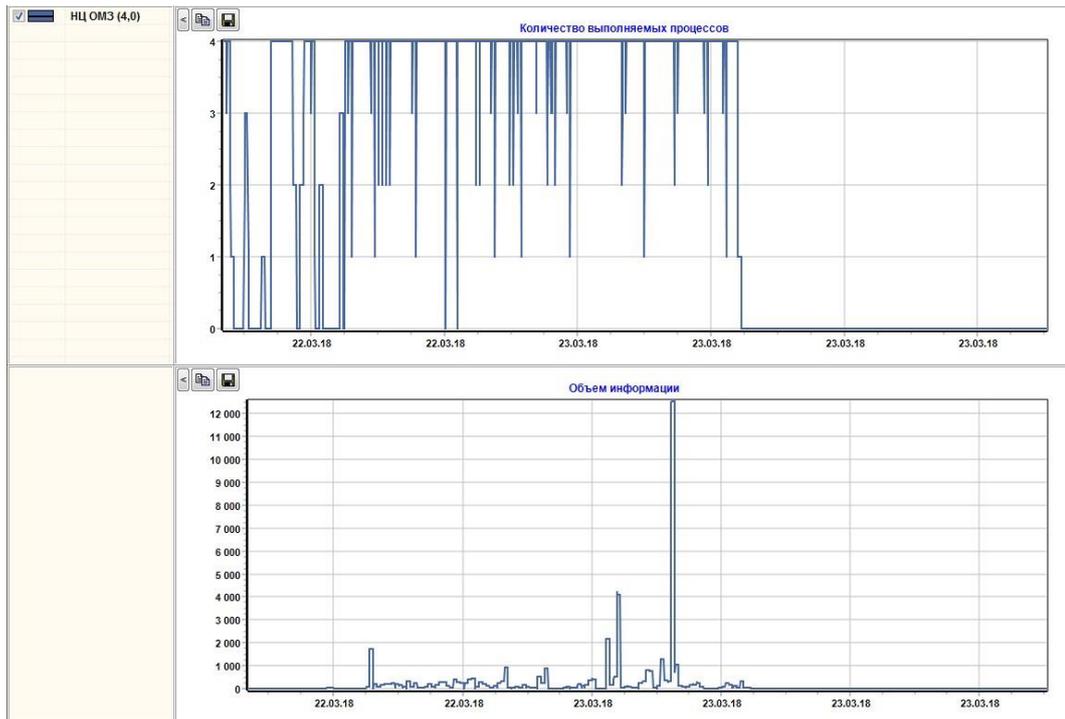


Рисунок 6.25 – Загрузка информации из долговременного архива согласно заданиям на стандартную обработку (22- 23 марта 2018 года)

На рисунке 6.26 представлено увеличение времени ожидания на загрузку данных из долговременного архива, что также подтверждается имеющейся практикой.

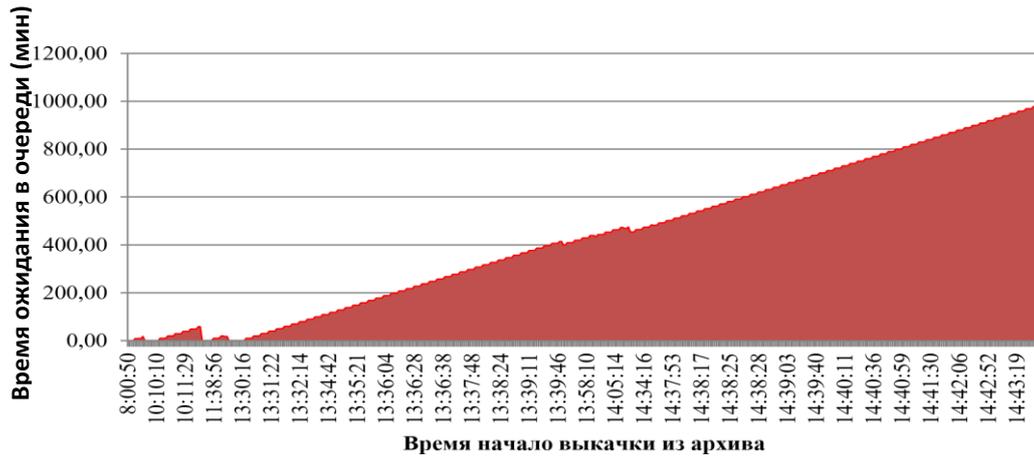


Рисунок 6.26 – Очередь на загрузку данных из долговременного архива (22- 23 марта 2018 года)

*Выявленное отличие от действий Оператора системы, приводящее к улучшению показателей эффективности:*

В соответствии с регламентом решения задачи после выгрузки маршруты должны быть распределены по двум ППИ (ППИ-1 и ППИ-2) для прохождения стандартной обработки, тем не менее в силу того, что при предложенном распределении в ППИ-1 потребовался всего 21 оператор, при ограничении в 28, передача информации для стандартной обработки в ППИ-2 пока оказалась нецелесообразной в силу низкой производительности данного ППИ и необходимости задействования канала передачи данных (рисунок 6.27).

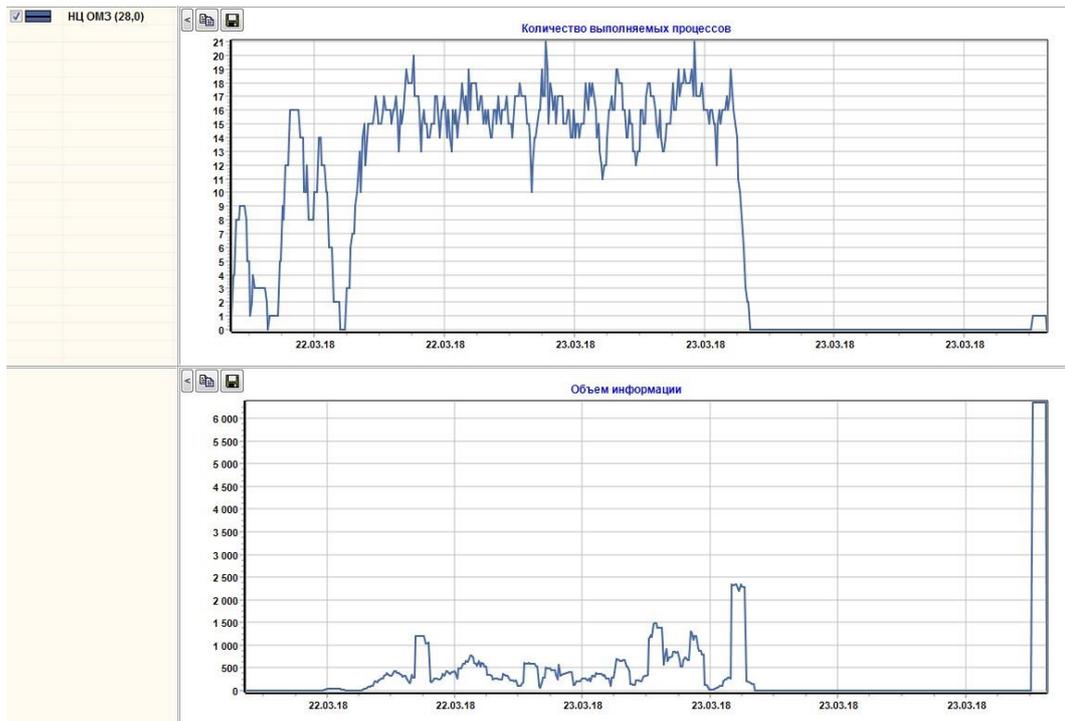


Рисунок 6.27 – Распределенная во времени стандартная обработка (22- 23 марта 2018 года)

Кроме того, полученные выше результаты говорят о том, что в ППИ-1 на данный момент имеется некоторый запас ресурсов для стандартной обработки за счет наличия «бутылочного» горлышка в процессе загрузки информации из долговременного архива.

Аналогичные результаты получаются и при использовании в качестве критерия времени обработки заявки (рисунок 6.28). Снова ни один из маршрутов не был отправлен в ППИ-2. Это произошло из-за дороговизны и малой производительности стандартной обработки на этом ППИ.

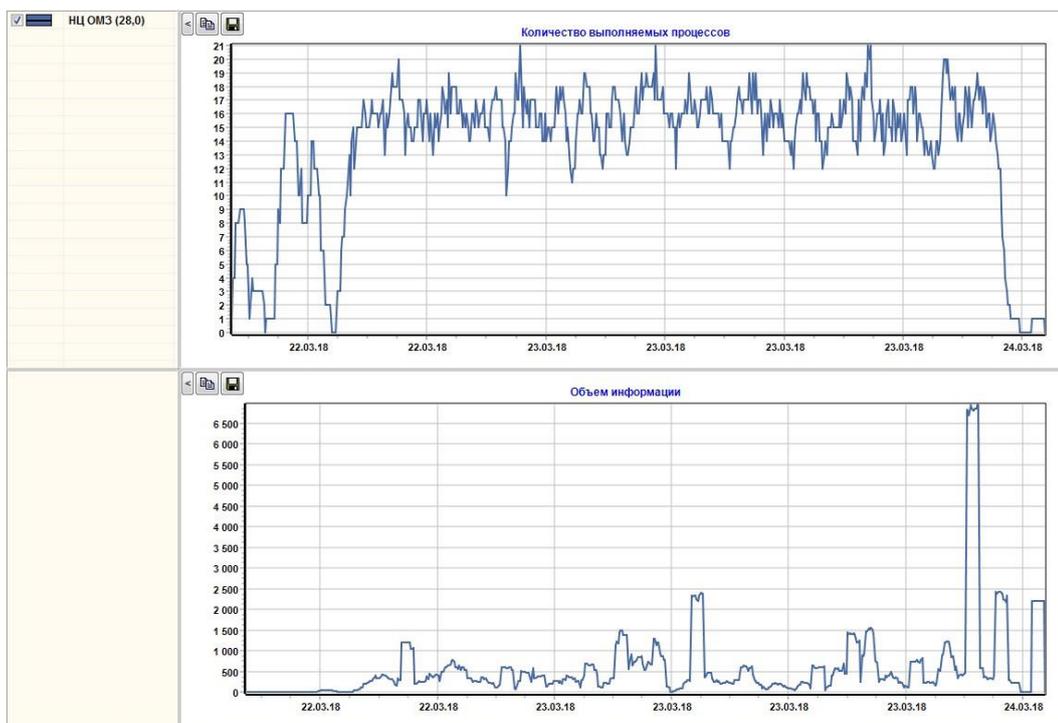


Рисунок 6.28 – Распределенная по времени стандартная обработка (минимизация времени)

## 6.2 Отработка определения стратегии проведения коррекций

В качестве типовых орбит КА ОГ ДЗЗ в работе рассматривались:

- низкие, близкие к круговым, с высотой 400~1000 км;
- круговые, в том числе перспективные с наклоном  $64.3^{\circ}$ ;
- эллиптические.

Необходимо отметить, что результаты, представленные в данном разделе носят качественный характер и показывают применимость предложенных подходов. Это вызвано тем, что эволюция орбит КА ОГ ДЗЗ зависит от целого ряда факторов, зависящих от времени, начальных параметров орбит, солнечной активности и т.п.

### 6.2.1 Отработка расчета стратегии проведения коррекций для круговых орбит

Отработка проводилась для перспективных круговых орбит высотой 35789 км, эксцентриситетом 0.0001 и наклоном  $64.8^{\circ}$ . При правильном формировании ОГ трассы таких КА будут совпадать (рисунок 6.29), что обеспечит

возможность постоянного наблюдения всей территории Российской Федерации (рисунок 6.30).

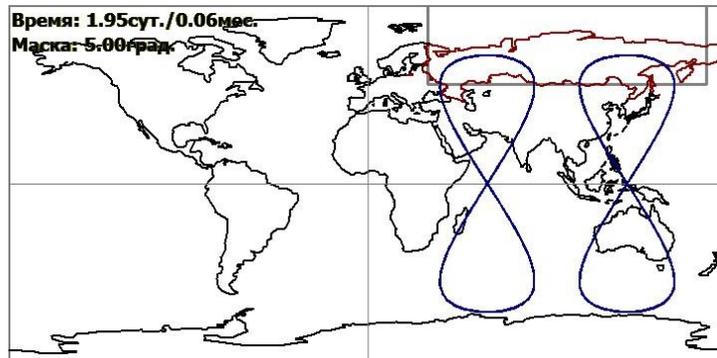


Рисунок 6.29 – Пример двухтрассовой группировки в трех орбитальных плоскостях, по два КА в каждой и наклонением  $64.8^{\circ}$

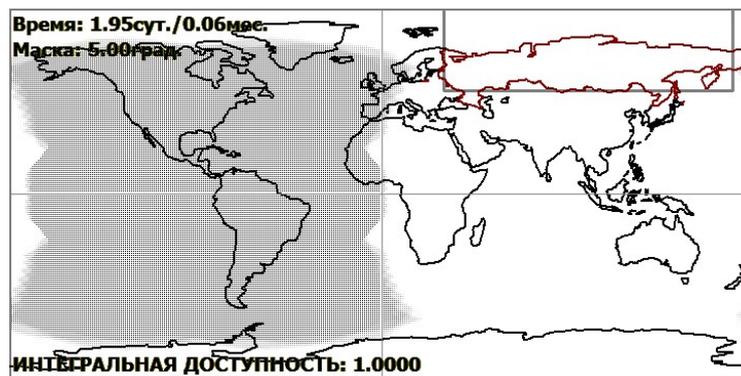


Рисунок 6.30 – Возможность непрерывного наблюдения с использованием ОГ на круговой орбите  $i = 64.8^{\circ}$

Требования к характеристикам двигательной установки для поддержания ОГ на получены на основании результатов расчетов стратегии коррекции двухтрассовой ОГ. Расчеты проведены с помощью модуля «Баллистика». Результаты расчета стратегии показаны на рисунке 6.31.

Стратегия коррекции GSNO.strat

Стратегия коррекции группировки  
Идентификатор : GSNO  
Наименование : суточная круговая орбита  
Срок активного существования 10 лет

Структура группировки

Номер	АДВУ	АШП	Накл	A	E	U	t до ВУ
1	120	270	64.8	42164.7	0	0.0	0
2	120	270	64.8	42164.7	0	300.0	14360
3	240	270	64.8	42164.7	0	240.0	28720
4	240	270	64.8	42164.7	0	180.0	43081
5	0	270	64.8	42164.7	0	120.0	57440
6	0	270	64.8	42164.7	0	60.0	71800

Число плоскостей 3  
Число КА в плоскости 2  
Число трасс 2  
Долготы узлов трасс 60 -> КА [2,4,6]  
120 -> КА [1,3,5]

Требования к стратегии коррекции  
Диапазон удержания ГДВУ +/-5 град от номинала  
Диапазон удержания эксц. 10 % от номинала  
Диапазон удержания АШП +/-10 град от номинала

Удержание долготы в режиме предельного цикла

#	ГДВУ	КА	Nk	Пер	Vx
1	60	[2,4,6]	9	370	4.3
2	120	[1,3,5]	15	232	9.2

Всего 13.50 м/с

Удержание эксцентриситета в режиме на границу

#	RAAN	КА	Nk	Пер	Vx
1	120	[1..2]	0	0	0.0
2	240	[3..4]	0	0	0.0
3	0	[5..6]	0	0	0.0

Всего 0.00 м/с

Рисунок 6.31 – Стратегия коррекции для круговой орбиты,  $i = 64.8^\circ$

На рисунке приняты следующие обозначения: «Номер» – порядковый номер КА; «АДВУ» – абсолютная долгота восходящего узла, град; «АШП» – аргумент широты перигея; «Накл» – наклонение плоскости орбиты, град; «A» – большая полуось, км; «E» – эксцентриситет орбиты; «U» – аргумент широты КА, град; «t до ВУ» – время движения до восходящего узла, с. Затем следует характеристика структуры: число орбитальных плоскостей, число КА в каждой плоскости; число трасс; таблица долгот восходящих узлов трасс с перечнем КА, образующих каждую трассу.

В части требований стратегии содержатся данные, для которых был выполнен расчет, например:

- диапазон удержания ГДВУ +/- 5 град от номинала;
- диапазон удержания эксц. 10 % от номинала;
- диапазон удержания АШП +/-10 град от номинала.

При расчете стратегии коррекции ГСНО максимально допустимое значение эксцентриситета было принято равным 0.002. Коррекции аргумента широты перигея не проводятся ибо на круговых орбитах он не определен.

В таблице 6.3 приведено обобщение результатов расчетов стратегии – числа коррекций, их периодичности и характеристической скорости удержания ГДВУ. Коррекция ГДВУ проводится по предельному циклу (см. п.3.2.2). Значения характеристической скорости округлены.

Таблица 6.3 – Результаты расчетов стратегии коррекции

ОГ	Число коррекций	Период, сут	Хар. скор. м/с
Круговая, $i = 64.8^0$	$9 \div 15$	$232 \div 570$	$4.3 \div 9.2$

Предельные циклы каждого КА ОГ, рассчитанные на интервале 5 лет, показаны на рисунке 6.32. Под каждым графиком указан номер КА, абсолютная долгота восходящего узла  $\Omega$  и коэффициент  $k$ . Графики наглядно показывают зависимость алгоритма удержания от коэффициента закона управления. Левая «колонка» графиков соответствует трассе с ГДВУ  $120^0$  в.д., правая – ГДВУ  $60^0$  в.д.

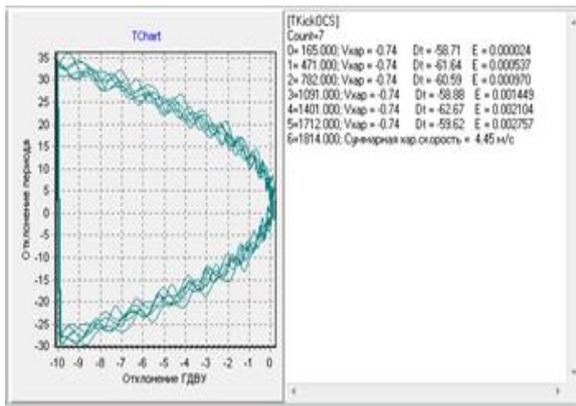
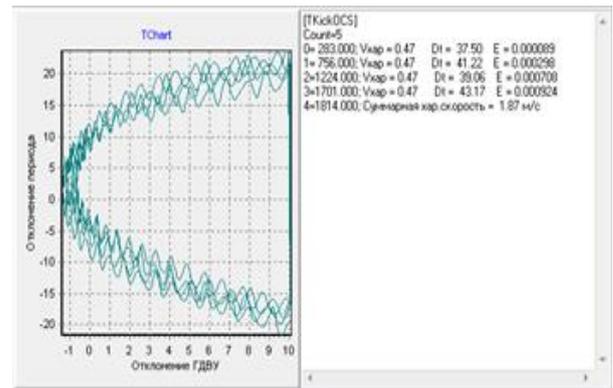
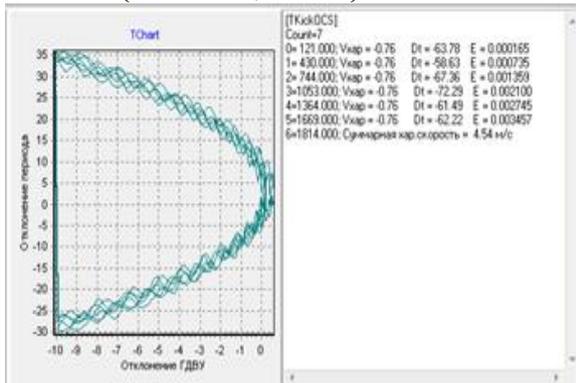
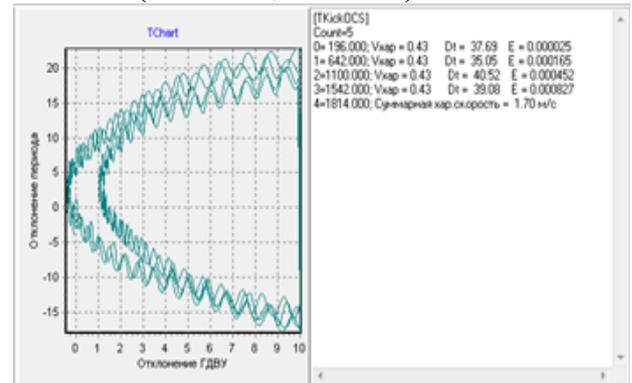
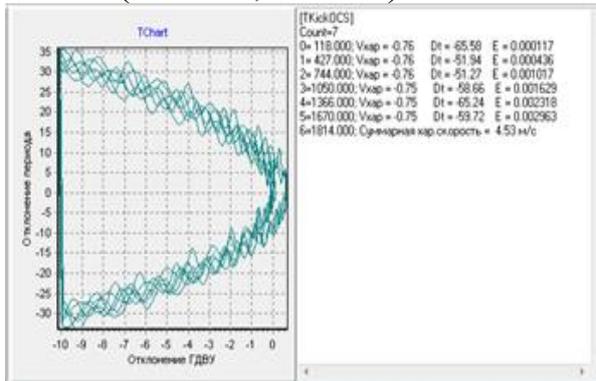
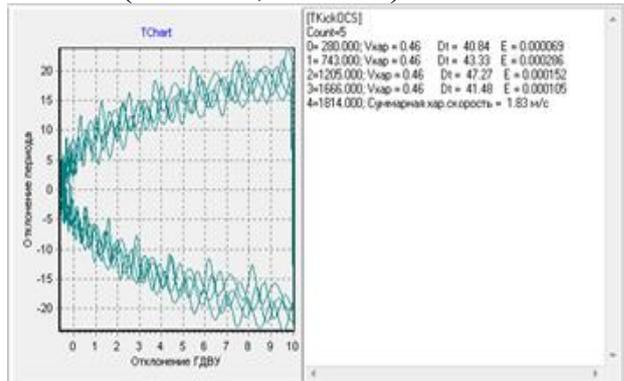
SAT-1 ( $\Omega = 120$ ,  $u = 0$ )  $k = 1.065$ SAT-2 ( $\Omega = 120$ ,  $u = 300$ )  $k = 1.05$ SAT-3 ( $\Omega = 240$ ,  $u = 240$ )  $k = 1.0$ SAT-4 ( $\Omega = 240$ ,  $u = 180$ )  $k = 0.95$ SAT-5 ( $\Omega = 0$ ,  $u = 120$ )  $k = 0.97$ SAT-6 ( $\Omega = 0$ ,  $u = 60$ )  $k = 0.94$ 

Рисунок 6.32 – Предельные циклы удержания ГДВУ  
двухтрассовой ОГ,  $i = 64.8^{\circ}$

## 6.2.2 Отработка расчета стратегии проведения коррекций для эллиптических орбит

Отработка проводилась для перспективных эллиптических орбит с высотой перигея 30000 км, эксцентриситетом 0.15 и наклоном  $64.8^{\circ}$ . При правильном формировании ОГ трассы таких КА будут совпадать (рисунок 6.33), что обеспечит

возможность постоянного наблюдения всей территории Российской Федерации (рисунок 6.34).

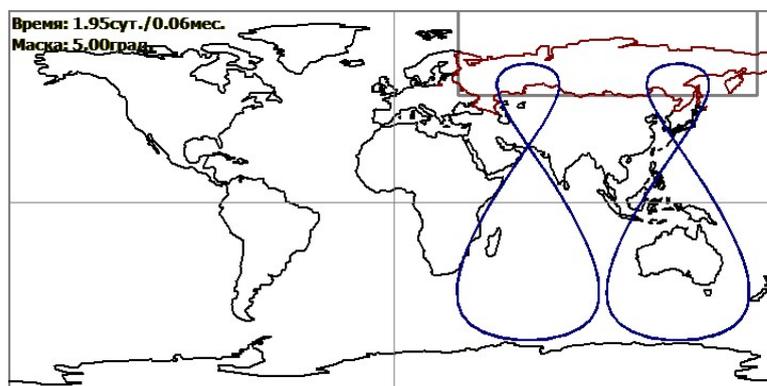


Рисунок 6.33 – Пример двухтрассовой группировки в трех орбитальных плоскостях, по два КА в каждой и наклонением  $64.8^{\circ}$

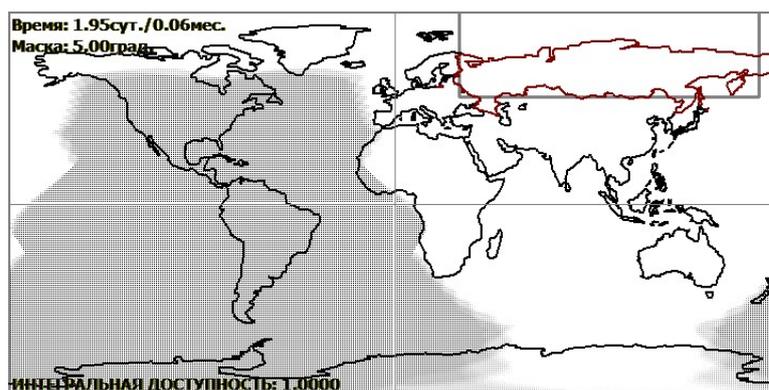


Рисунок 6.34 – Возможность непрерывного наблюдения с использованием ОГ на круговой орбите  $i = 64.8^{\circ}$

Требования к характеристикам двигательной установки для поддержания ОГ на получены на основании результатов расчетов стратегии коррекции двухтрассовой ОГ в режимах приведения эксцентриситета и аргумента широты перигея к номиналу или к граничному значению. Расчеты проведены с помощью модуля «Баллистика». Результаты расчета стратегии показаны на рисунке 6.35.

Стратегия коррекции M15.strat

Стратегия коррекции группировки  
Идентификатор : M15  
Наименование : суточная наклонная орбита  $e=0.15$

Структура группировки

Номер	АДВУ	АШП	Накл	A	E	U	t до ВУ
1	140	270	64.8	42164.8	0.15	360.0	0
2	140	270	64.8	42164.8	0.15	287.6	14360
3	260	270	64.8	42164.8	0.15	208.6	28720
4	260	270	64.8	42164.8	0.15	147.5	43081
5	20	270	64.8	42164.8	0.15	99.6	57440
6	20	270	64.8	42164.8	0.15	54.0	71800

Число плоскостей 3  
Число КА в плоскости 2  
Число трасс 2  
Долготы узлов трасс 80 -> КА [2,4,6]  
140 -> КА [1,3,5]

Требования к стратегии коррекции  
Диапазон удержания ГДВУ +/-5 град от номинала  
Диапазон удержания эксц. 10 % от номинала  
Диапазон удержания АШП +/-10 град от номинала

Удержание долготы в режиме предельного цикла

#	ГДВУ	КА	Nk	Пер	Vx
1	80	[2,4,6]	7	496	4.5
2	140	[1,3,5]	13	262	9.2
-----					Всего 13.70 м/с

Удержание эксцентриситета в режиме к номиналу

#	RAAN	КА	Nk	Пер	Vx
1	140	[1..2]	6	601	142.8
2	260	[3..4]	4	885	91.7
3	20	[5..6]	1	3070	23.8
-----					Всего 258.30 м/с

Удержание АШП в режиме к номиналу

#	RAAN	КА	Nk	Пер	Vx
1	140	[1..2]	5	665	229.5
2	260	[3..4]	4	737	148.6
3	20	[5..6]	1	1915	44.0
-----					Всего 422.10 м/с

Рисунок 6.35 – Стратегия коррекции для круговой орбиты,  $i = 64.8^0$

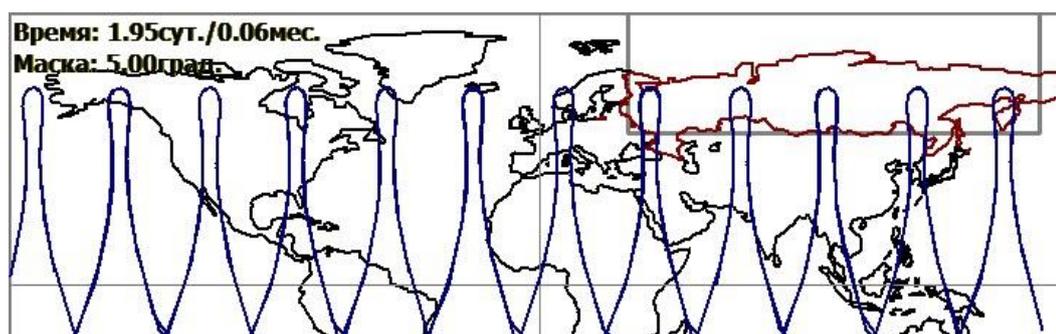
В таблице 6.4 приведено обобщение результатов расчетов стратегии – числа коррекций, их периодичности и характеристической скорости удержания ГДВУ, эксцентриситета и аргумента перигея для режимов приведения (к номиналу, на границу). Коррекция ГДВУ проводилась по предельному циклу (см. п.3.2.2). Коррекция эксцентриситета и аргумента перигея проводилась либо к номиналу, либо на границу, чтобы увеличить время эволюции. Значения характеристической скорости округлены.

Таблица 6.4 – Результаты расчетов стратегии коррекции

ОГ	Корректируемый параметр	Число коррекц	Период, сут	Хар. скор. м/с	
Эллиптическая, $i = 64.8^{\circ}$	ГДВУ		7 ÷ 13	262 ÷ 496	5 ÷ 9
	Эксцентриситет	к номиналу	1 ÷ 6	600 ÷ 3070	24 ÷ 143
		на границу	1 ÷ 3	1200 ÷ 3070	48 ÷ 143
	Аргумент перигея	к номиналу	1 ÷ 5	665 ÷ 1915	44 ÷ 230
		на границу	1 ÷ 2	1330 ÷ 1915	87 ÷ 180

### 6.2.3 Отработка расчета стратегии проведения коррекций для высокоэллиптических орбит

Отработка проводилась для перспективных высокоэллиптических орбит КА типа «Арктика-М» с высотой апогея 30000 км, эксцентриситетом 0.7 и наклоном  $64.8^{\circ}$ . На рисунке 6.36 представлены трассы КА. При правильном формировании ОГ это обеспечит проведение гидрометеорологических наблюдений арктического региона (рисунок 6.37) с частотой обновления данных, аналогичной КА на геостационарных орбитах.

Рисунок 6.36 – Пример шеститрассовой группировки с наклоном  $64.8^{\circ}$

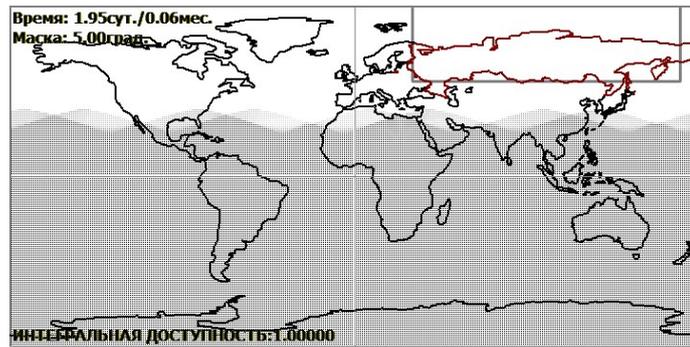


Рисунок 6.37 – Возможность непрерывного наблюдения с использование ОГ на круговой орбите  $i = 64.8^{\circ}$

На рисунке 6.38 – 6.40 представлены результаты эволюции периода обращения, эксцентриситета, радиуса апогея и компенсация их ухода после проведения коррекции (обведено красным)



Рисунок 6.38 – Отработка компенсации ухода периода обращения



Рисунок 6.39 – Отработка компенсации ухода эксцентриситета

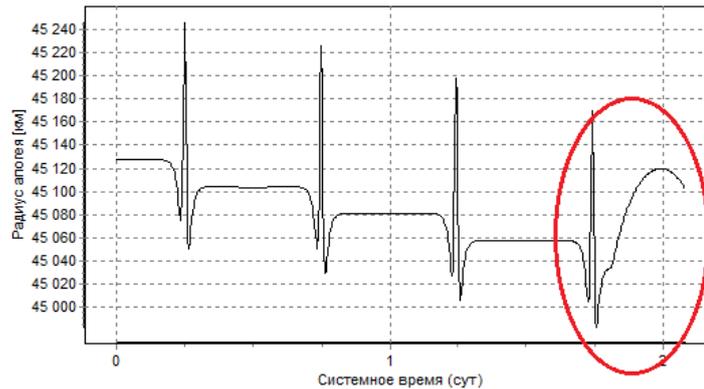


Рисунок 6.40 – Отработка компенсации ухода радиуса перигея

#### 6.2.4 Отработка расчета стратегии проведения коррекций для низких круговых орбит

Основными возмущениями, действующими на КА, находящийся на низких круговых орбитах на высоте 510 км. Воздействие на КА всего комплекса возмущений приводит к существенному снижению высоты орбиты. При этом, темп уменьшения скорости КА и снижение высоты существенно зависят от случайных возмущений, связанных с солнечной активностью и изменением параметров атмосферы. Тем не менее, скорость уменьшения высоты незначительна, что позволяет заранее определить стратегию коррекций. На рисунке 6.41 представлены результаты моделирования снижения высоты в процессе эволюции и ее восстановления после коррекции. В качестве допустимого падения взята величина 2 км. Изменение высоты за 24 часа составило порядка 120 м., периодичность коррекций при этом – порядка 15 суток, приращение характеристической скорости на коррекцию – порядка 1 м/с.

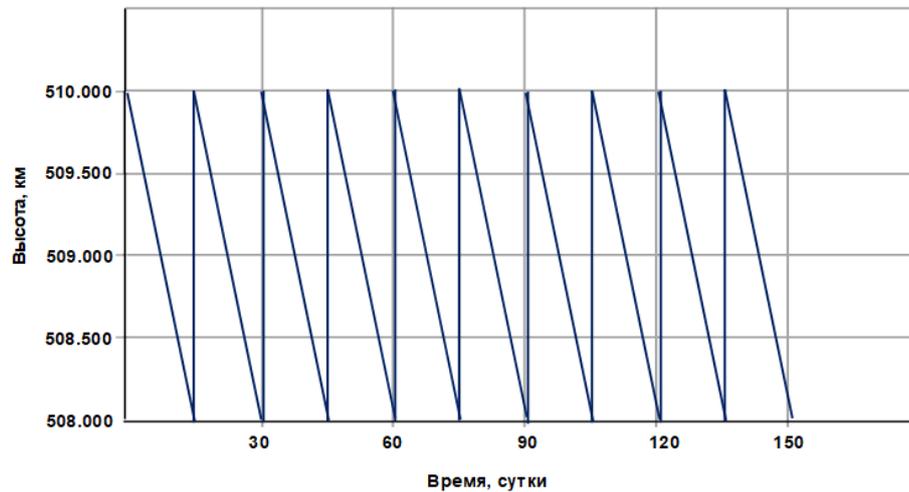


Рисунок 6.41 – Обработка коррекции высоты

### 6.3 Выводы по главе 6

В главе представлены результаты экспериментальной отработки распределения потоков целевой информации при функционировании космической системы ДЗЗ. В качестве исходных данных были использованы действующий состав и характеристики российской орбитальной группировки и наземных пунктов ЕТРИС ДЗЗ.

Для экспериментальной отработки сформирован типовой сценарий, включающий в себя следующие процессы:

- прием информации;
- первичную обработку;
- каталогизацию;
- стандартную обработку.

Для наглядности представления результатов в качестве основных пунктов обработки были выбраны два, удаленных друг от друга ППИ. Используя реальные данные были рассчитаны коэффициенты стоимости обработки информации ДЗЗ на каждом наземном пункте. Стоимость обработки космическим сегментом не учитывалась.

На основе реальных данных по обработке в течении суток заявок потребителей определены форма и параметры математических моделей для расчетов трафика в системе, времени выполнения процессов и ограничений. Для расчета стоимости обработки использовалась экспертная информация о средней заработной плате операторов наземных пунктов и их производительности.

Экспериментальная отработка проходила в несколько этапов.

На первом этапе проверялась корректность работы ПМК при формировании исходных данных по ОГ КА ДЗЗ и НКПОР, сценариев и процессов обработки информации, а также политики распределения ресурсов.

Так как на выбранную дату вся обработка шла в ППП-1, то он был выбран в качестве объекта исследований. Программе было предложено распределить заявки для обработки. Результаты подтвердили реальную картину: оператор на первичной обработке так же наиболее загружен в утренние и вечерние часы, но только после того, как закончился прием. После первичной обработки каждый маршрут уходит на каталогизацию, утренний поток информации полностью закаталогизирован к половине третьего, ночной – к половине первого ночи.

На втором этапе экспериментальной отработки была проведена проверка на двух выбранных ППИ. В ППИ-1, как и в ППИ-2, есть полный цикл обработки информации. Отличие заключается в том, что в ППИ-2 работает гораздо меньше людей по сравнению с ППИ-1, и один человек занимается и первичной обработкой, и каталогизацией, следовательно, его производительность работы меньше по сравнению с ППИ-1.

Здесь можно отметить не только адекватное поставленным условиям поведение математической модели, но и появление нового решения, отличного от выбранного Оператором, которое привело к улучшению показателей: то, что было принято в ППИ-2, осталось там же и на дальнейшую обработку, плюс добавилась часть маршрутов, принятых в ППИ-1, поскольку в нем наблюдалась большая загруженность, в то время как после утреннего приема ППИ-2 больше информацию не принимал.

При выборе в качестве показателя оперативности выполнения заявки эффект повторился. Было предложено лучшее, чем использовалось при реальной обработке, распределение процессов, а именно: для минимизации времени нужно гораздо большее число маршрутов обрабатывать в ППИ-2, потому что ППИ-1 был сильно загружен. Утренняя первичная обработка в ППИ-2 пришла в ППИ-1, загруженный вечер в ППИ-1 ушел на ППИ-2.

Следующим этапом отработки являлась проверка возможностей ПМК для проведения системных исследований, в частности было проведено исследование заявок по стандартной обработке. Здесь тоже удалось достигнуть улучшения по сравнению с существующим регламентом. Вместо распределения стандартной обработки по двум ППИ предложено использовать только ППИ-1, поскольку передача информации для стандартной обработки в ППИ-2 оказалась нецелесообразной в силу низкой производительности данного ППИ и необходимости задействования канала передачи данных. Кроме того, результаты подтвердили реально имеющийся эффект «бутылочного горлышка», когда, при увеличении количества заявок, образуется очередь на выгрузку данных из архива, после которой заявки обрабатываются уже только в ППИ-1 без передачи в другие ППИ. При существующем количестве операторов стандартной обработки на данный момент это не критично, но при увеличении количества заявок приведет к тому, что будет трудно сохранить штатную работоспособность системы.

В заключении была отработана возможность формирования ограничений на проведение съемки, связанное с необходимостью проведения коррекций. С этой целью были проведены расчеты для низких круговых, круговых, эллиптических и высокоэллиптических орбит. Результаты подтвердили правильность предложенных моделей и алгоритмов. Новизной здесь является то, что для подтверждения соответствующей методики и расчетов были выбраны не только хорошо известные низкие круговые и высокоэллиптические орбиты, а еще недостаточно изученные и, по мнению автора, перспективные типы круговых и эллиптических орбит, позволяющие при правильном формировании ОГ обеспечить

круглосуточный мониторинг всей территории Российской Федерации, включая арктические области.

Таким образом, полученные при экспериментальной обработке результаты позволяют сделать следующие выводы:

- математическая модель и методика решения задачи управления распределением целевой информации при функционировании космической системы ДЗЗ, включающей в себя разнотипные космические аппараты и наземный комплекс приема обработки и распределения информации успешно прошла экспериментальную обработку в условиях, приближенных к реальным с положительным результатом;
- полученные в результате решения позволяют уменьшить оперативность и стоимость обработки заявки по сравнению с решениями, используемыми в настоящее время Оператором системы;
- программное обеспечение, реализующее разработанную математическую модель, обеспечивает широкие возможности по настройке моделируемой системы, как по составу, так и по характеристикам;
- разработанные математическая модель и методики распределения информационных потоков по составным частям ЕТРИС ДЗЗ, а также созданное на их основе программное обеспечение может служить инструментом для обоснования направлений модернизации и унификации существующей ЕТРИС ДЗЗ.

## Заключение

Основной результат настоящего исследования состоит в разработке методики и новых научно обоснованных теоретических основ решения важной научной проблемы управления потоками целевой информации при функционировании космической системы дистанционного зондирования Земли, а также создании новых технических решений, внедрение которых имеет существенное значение для совершенствования отечественной космической системы ДЗЗ. Показано, что решение исходной задачи сводится к ряду новых частных подзадач, совместное решение которых позволяет обеспечить решение исходной.

Для решения упомянутых подзадач получены следующие результаты, обладающие научной новизной

1. В интересах решения основной задачи впервые проведена декомпозиция космической системы ДЗЗ как сложной информационной организационно-технической системы, по результатам которой:

- определены системные и потребительские характеристики ее элементов;
- определены основные рабочие процессы в системе;
- сформированы показатели эффективности системы, которые были разделены на группы: технические, функциональные и интегральные;

Обоснована возможность объективного свертывания вышеперечисленных показателей и перехода к двум частным, характеризующим эффективность целевого функционирования системы в целом: оперативности (времени) выполнения заявок потребителя на получение готового тематического продукта и стоимость готового тематического продукта. Обоснован выбор независимых переменных – системного времени и объема информации.

Результатом стало формальное представление задачи распределения потоков целевой информации при функционировании космической системы ДЗЗ как последовательности операций связанных с:

- формированием заявки;

- определением перечня запросов к системе, необходимых для выполнения заявки;
- определением процессов и последовательности их выполнения, которые будут обрабатывать соответствующие запросы;
- оптимизацией временного распределения процессов по элементам системы, с учетом выбранных показателей эффективности и имеющихся ограничений.

2. Сформулирована, обладающая новизной, математическая постановка оптимизационной задачи и определен перечень взаимосвязанным математических моделей, требующих разработки в рамках данной работы:

- модель заявки потребителя;
- модель процесса обработки информации космическим сегментом;
- модель обработки информации наземным сегментом;
- модель передачи данных.

Каждая из этих моделей описывает процесс обработки, в том числе определяет, что происходит с объемом информации и вычисляет системные показатели эффективности – время, требуемое для реализации процесса и его условную стоимость.

В результате единая модель обработки информации представлена как взаимосвязанная последовательность функций изменения условного объема информации при применении к нему соответствующего процесса обработки (функция изменения трафика), а математическая постановка задачи сведена к оптимизации маршрута прохождения заявки по графу. Сформулированы условия применимости предлагаемого подхода к решению задачи.

3. В интересах решаемой задачи сформирована единая математическая модель орбитальной группировки КА ДЗЗ, включающая в себя:

- модели съемки земных объектов
- модель передачи целевой информации между КА и ППИ
- модели целевой аппаратуры бортового информационного комплекса КА

- модель движения в задаче высокоточного определения и прогнозирования состояния КА;
- модель проведения орбитальных коррекций КА ДЗЗ (стратегии коррекций).

В результате время, необходимое для проведения съемки по заявке определяется как совокупность суммарного времени проведения съемки, времени, необходимого для переориентации аппаратуры наблюдения и времени, необходимого для того, чтобы КА оказался в зоне взаимной радиовидимости с одним из ППИ, при условии, что:

- объема памяти БЗУ достаточно для сохранения снимка объекта съемки на протяжении всего интервала наблюдений.
- КА в это время не совершает корректирующие маневры;

Определено, что для рассматриваемого класса орбит имеют место следующие возмущения, требующие проведения коррекций: долгопериодическое возмущение гринвичской долготы восходящего узла трасс, вековые возмущения эксцентриситета, аргумента перигея, наклона и абсолютной долготы восходящего узла. В качестве алгоритма управления долготой восходящего узла предложено использовать полученный автором алгоритм, основанный на применении достаточных условий оптимальности. Особенностью данного алгоритма является то, что его линейная модель движения содержит два типа аддитивных возмущений — систематические неслучайные и случайные. Наличие в модели аддитивной неслучайной составляющей позволяет учесть дополнительные возмущения, которые отбрасываются при упрощении модели и ее линеаризации. Этим она отличается от традиционных моделей.

4. Впервые разработана единая форма представления моделей обработки информации для космических аппаратов, наземных пунктов и линий связи как элементов единой информационной системы, включающая в себя:

- модель расчета объема выходной информации;
- модель расчета времени выполнения процесса;
- упрощенная модель расчета стоимости

Предложены способы программной реализации перечисленных моделей в рамках специализированного программно-моделирующего комплекса. При этом учитывалась необходимость обеспечения возможности оперативного внесения изменений как в форму представления, так и в параметры модели.

5. В рамках практической реализации методики предложен технический облик нового программно-моделирующего комплекса для оптимизации распределения потоков целевой информации при функционировании космической системы ДЗЗ, на основе которого разработан комплекс программ, который позволяет решать следующие задачи:

- оптимизировать распределение процессов обработки информации по заявкам потребителей, используя как скалярный (стоимость или время), так и векторный критерий (стоимость + время).
- автоматизированное формирование плана распределения обработки заявок потребителей по узлам космической системы ДЗЗ (технологическую карту);
- проводить оценку текущего состояния инфраструктуры с точки зрения возможностей обработки заявок потребителей и выявлять возможные проблемы со штатной работоспособностью в будущем.

Определено, что программно-математический комплекс должен состоять из трех модулей для:

- прогнозирования неуправляемого движения спутников орбитальной группировки с учетом принятой стратегии управления под действием различных возмущающих факторов на интервале планирования;
- определения возможных интервалов времени проведения съемки и обмена информацией между КА и ППИ;
- решения задачи оптимизации распределения процессов обработки информации по элементам космической и наземной инфраструктуры.

Главной отличительной особенностью предложенной в работе методики и технического облика программно-моделирующего комплекса является:

- возможность внешнего описания вида и параметров математических моделей расчета показателей эффективности, функции преобразования трафика и ограничений;
- возможность независимого использования модулей друг от друга;
- возможность использования модулей в пакетном режиме, что обеспечивает открытость архитектуры ПМК и позволяет внедрять их в программы других разработчиков.

Существенную практическую значимость представляют результаты, подтверждающие состоятельность предложенного подхода к решению научной проблемы управления потоками целевой информации при функционировании космической системы дистанционного зондирования Земли, а именно:

- подтверждена возможность повышения общего уровня планирования процессов распределения потоков целевой информации по составным частям информационной системы в целом;
- подтверждена возможность повышения уровня автоматизации распределения потоков целевой информации по составным частям информационной системы в целом;
- подтверждена возможность оптимизации распределения процессов обработки результатов съемки по разным ППИ с учетом их производительности, а также территориального и временного факторов;
- подтверждена состоятельность системы взаимосвязанных математических моделей функционирования космического и наземного сегментов как элементов единой информационной системы;
- подтверждена состоятельность предложенного подхода к формированию стратегии коррекций КА ОГ ДЗЗ;
- представлена возможность анализа состава и топологии наземных центров с точки зрения определения основных показателей, что существенно упрощает проведения дальнейших системных исследований.

Все результаты были подтверждены в ходе экспериментальной отработки. В качестве исходных данных были использованы действующий состав и характеристики российской орбитальной группировки и наземных пунктов существующей ЕТРИС ДЗЗ. Экспериментальная отработка проходила в несколько этапов, наиболее важными прикладными результатами которой являются следующие:

- математическая модель и методика решения задачи распределения целевой информации при функционировании космической системы ДЗЗ, включающей в себя разнотипные космические аппараты и наземный комплекс приема обработки и распределения информации успешно прошла экспериментальную отработку в условиях, приближенных к реальным с положительным результатом;
- результаты, полученные при экспериментальной отработке, в сравнении с решениями, используемыми Оператором системы, показали не только адекватное поставленным условиям поведение математической модели, но и привели к появлению нового решения, снижающего выбранные для оптимизации показатели оперативности и стоимости обработки заявки;
- программное обеспечение, реализующее разработанную математическую модель, обеспечивает широкие возможности по настройке моделируемой системы, как по составу, так и по характеристикам;
- разработанные математическая модель и методики распределения информационных потоков по составным частям космической системы ДЗЗ, а также созданное на их основе программное обеспечение может служить инструментом для обоснования направлений модернизации и унификации космической системы ДЗЗ.

### Список сокращений и условных обозначений

БЗУ	– бортовое запоминающее устройство
ВБИК	– видимый и ближний ИК–диапазоны
ВПВО	временные последовательности выполнения операций
ВО	– высокоэллиптическая орбита
ВР	– высокое пространственное разрешение
ДЗЗ	– дистанционное зондирование Земли
ГСА	– гиперспектральная съемочная аппаратура
ГСО	– геостационарная орбита
ЕТРИС	– единая территориально–распределенная информационная система
ИК	– инфракрасный
КА	– космический аппарат
КМСС	– комплекс многозональной спутниковой съемки
КС	– космическая система
КСН	– космическая система наблюдения
КШМСА	– комплекс широкозахватной мультиспектральной съемочной аппаратуры высокого
МВК	– многозональная высокодетальная камера
МС	– мультиспектральный
МСС	– мультиспектральная съемочная система
МСУ	– многозональное сканирующее устройство
МСУ МР	– многозональное сканирующее устройство малого разрешения
НКИ	– наземная космическая инфраструктура
НКПОР	– наземный комплекс приема, обработки и распространения информации
НКУ	– наземный комплекс управления

НЦ ОМЗ	– научный центр оперативного мониторинга Земли
ОАЭ	– оптико–электронная аппаратура
ОГ	– орбитальная группировка
ОС	– операционная система
ОЭА	– оптико–электронная аппаратура
ПМК	– Программно–моделирующий комплекс
ПО	– программное обеспечение
ППИ	– пункт приема информации
ПСС	– панхроматическая съемочная система
ПХ	– панхроматический
РЛ	– радиолокационный
РСА	– радиолокатор с синтезированием апертуры
СВР	– сверхвысокое пространственное разрешение
СР	– среднее разрешение
ССО	– Солнечно–синхронная орбита
СХД	– система хранения данных
ШМСА–ВР	– широкозахватная мультиспектральная камера высокого разрешения
ШМСА–СР	– широкозахватная мультиспектральная камера среднего разрешения

### Список литературы

1. Аксенов Е.П. Специальные функции в небесной механике. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986.
2. Автоматические космические аппараты для фундаментальных и прикладных научных исследований / Под общ. ред. Г.М. Полищука и К.М. Пичхадзе. М.: Изд-во МАИ-Принт, 2010. 659 с.
3. Ахрамович С.А., Баринов А.В., Малышев В.В., Старков А.В. Синтез системы управления беспилотного летательного аппарата по высоте методом бэкстеппинга // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2018. Т. 17, № 2. С. 7-22. DOI: 10.18287/2541-7533-2018-17-2-7-22
4. Ахрамович С.А., Малышев В.В., Старков А.В. Математическая модель движения беспилотного летательного аппарата в Бикватернионной форме // Общероссийский научно-технический журнал «ПОЛЕТ», №4 2018 с.9-20
5. Бажинов И.К., Почукаев В.Н. Оптимальное планирование навигационных измерений в космическом полете. – М.: Машиностроение, 1976. – 288 с.
6. Беленов А.В. Стандартные уровни обработки и форматы представления данных ДЗЗ ИЗ КОСМОСА. Мировой опыт // Геоматика. 2009. № 4. с. 18–20.
7. Бобронников В. Т., Козорез Д. А., Красильщиков М. Н., Лебедев А. А., Малышев В.В. Статистическая динамика и оптимизация управления летательных аппаратов. М.: Альянс, 2013. 403 с.
8. Бобронников В.Т., Дарнопых В.В., Малышев В.В., Шидловский А.В. Автоматизация оперативного планирования и анализа эффективности целевого функционирования спутниковых систем мониторинга // Космонавтика и ракетостроение. – 2003, № 4. – с. 47–62.
9. Борисов А.В., Емельянов А.А., Емельянов К.С. Подходы к формированию обобщенных критериев эффективности космических систем ДЗЗ с учетом требований потребителей // XXII международная научная конференция «Системный анализ, управление и навигация»: Тезисы докладов. Сборник. М.: Изд-во МАИ-ПРИНТ, 2017, с. 79-80.

10. Борисов А.В., Емельянов А.А., Ерешко М.В. Моделирующий стенд как технологическая платформа обеспечения жизненного цикла развития систем (методов) целевого применения перспективной космической системы ДЗЗ // XXIV международная научная конференция «Системный анализ, управление и навигация»: Тезисы докладов. Сборник. М.: Изд-во МАИ-ПРИНТ, 2019, с. 199-200.
11. Василевский В.В., Занин К.А. Синтез многоцелевой системы мониторинга земной поверхности // Сборник научных трудов ФГУП «НПО им. С.А. Лавочкина» «Актуальные вопросы проектирования космических систем и комплексов». – М.: Изд-во «Блок-Информ-Экспресс». – 2005, выпуск № 6. – с. 40–45.
12. Василевский В.В., Занин К.А. Синтез многоцелевой системы мониторинга земной поверхности // Системный анализ, управление и навигация. 10-я международная конференция, Евпатория, 2005: Сборник трудов. – М.: МАИ, 2005. – с. 47.
13. Василевский В.В., Занин К.А. Системный анализ задачи создания интегрированной системы мониторинга земной поверхности в реальном масштабе времени // Труды XXX Академических научных чтений по космонавтике им. с.П. Королева. – М.: Изд-во «Война и мир», 2006. – с.89.
14. Виноградов В.А. Декомпозиционный подход к задаче информационного обслуживания конкурирующих источников. // Задачи оптимизации сложных технических систем: Тематический сборник научных трудов МАИ. – М.: МАИ, 1990. – с.9–13.
15. Ворожцов А. С., Тутова Н.В. Алгоритм решения задач: оптимизации распределения ресурсов центров обработки данных в сети Интернет // Т-Сотт: Телекоммуникации и: транспорт: спецвыпуск по итогам 3-й отраслевой научной конференции "Технологии информационного общества", Выпуск II, 2009. – С. 144–146.
16. Гарбук С.В., Гершензон В.Е. Космические системы дистанционного зондирования Земли. – М.: А и Б, 1997. – 296 с.

17. Глазкова И.А. Комплексная космическая система дистанционного зондирования Земли «Монитор» / *Аэрокосмический курьер*. – М, 2003. – № 1(25).
18. Геоинформационные системы и технологии / Конспект лекций по специальности 120201 «Исследование природных ресурсов аэрокосмическими методами». – Красноярск: СФУ, 2007. – 150 с.
19. Григорьев А.Н. Модель бортовой оценки облачности над районом съемки при дистанционном зондировании из космоса // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2015. Т. 12. № 4. с. 143–150
20. Гришин В.М. Вопросы маршрутизации информации в низкоорбитальных спутниковых системах. // *Бортовые интегрированные комплексы и современные проблемы управления*. Международная конференция, Ярополец, 1998: Сборник трудов. – М.: МАИ, 1998. – с.42–43.
21. Гришин В.М., Иванов Д.А. Моделирование совместной работы космического сегмента и станций сопряжения НКСС «Иридиум» // *Системный анализ и управление космическими комплексами. Исследование и освоение космоса в наступающем веке*. 5-я Международная конференция, Евпатория, 2000: Сборник трудов. – М.: МАИ, 2000, с.51–52.
22. Гришин В.М., Таперов М.Ю. Метод исследования сетевых структур информационных систем с использованием специального вычислительного устройства. // *Исследование операций: Сб. работ Института математики СибАН*. – Новосибирск: НГУ, 1991. – выпуск 12.
23. Дарнопых В.В. О едином методическом подходе к формализации задач планирования целевого функционирования // *3-я Международная конференция и выставка «Авиация и космонавтика – 2004»*: Тез.докл. – М.: МАИ, 2004. – с. 65.

24. Дарнопых В.В. Оптимальное планирование целевого функционирования низкоорбитальных космических систем связи и наблюдения // автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук: 05.13.01 / Московский авиационный институт (государственный технический университет). Москва, 1999.
25. Дарнопых В.В. Планирование целевого функционирования космических аппаратов и систем: задачи, методы и алгоритмы их решения // Интернет-журнал «Труды МАИ» – М.: МАИ, 2004, выпуск № 16. – 15 с.
26. Дарнопых В.В. Применение единого методического подхода к оперативному планированию целевого функционирования спутниковых систем мониторинга и связи / Известия РАН. Теория и системы управления. – № 1, 2010. – с.118–137.
27. Дарнопых В.В., Ефанов В.В., Занин К.А., Малышев В.В. Синтез информационного тракта при планировании целевого функционирования космических систем наблюдения по критериям качества / Известия РАН. Теория и системы управления. – № 4, 2010. – с.100–107.
28. Дарнопых В.В., Занин К.А., Малышев В.В. Управление коррекцией относительного положения космических аппаратов в кинематически-правильных орбитальных группировках при планировании их целевого функционирования / Известия РАН. Теория и системы управления. – № 1, 2012. – с.109–107..
29. Дарнопых В.В., Малышев В.В. Оптимизация баллистического построения орбитальных группировок космических систем наблюдения на основе оперативного планирования их целевого функционирования / Вестник МАИ. – т.18, № 6, 2011. – с.25–34.
30. Дарнопых В.В., Малышев В.В. Планирование управления съемочной аппаратурой системы космических аппаратов / Известия Академии наук. Сер. Теория и системы управления. – 1998, № 6. – с.135–149.

31. Дарнопых В.В., Малышев В.В., Усовик И.В. Многокритериальная оптимизация эффективности целевого функционирования орбитальных группировок систем дистанционного зондирования земли на основе оперативного планирования // Вестник Московского авиационного института. 2014. Т. 21. № 5. с. 37-52.
32. Дворкин Б.А. Импортозамещение в сфере геоинформационных технологий и ДЗЗ // Геоматика. №1, 2015, с. 16–27
33. Дворкин Б.А., Дудкин С.А. Новейшие и перспективные спутники дистанционного зондирования Земли // Геоматика. 2013. № 2. с. 16–36.
34. Дядюченко В.Н., Носенко Ю.И., Полищук Г.М. и др. Высокоэллиптическая космическая система для гидрометеорологического мониторинга Арктического региона Земли / Бюллетень Всемирной Метеорологической Организации (ВМО). – 2007, т.56, № 4.
35. Емельянов А.А. Проект «Цифровая Земля»: решения по созданию единого информационного пространства российской отрасли дистанционного зондирования земли // XXIII международная научная конференция «Системный анализ, управление и навигация»: Тезисы докладов. Сборник. М.: Изд-во МАИ-ПРИНТ, 2018, с. 171-172.
36. Емельянов А. А., Малышев В. В., Смольянинов Ю. А., Старков А. В. Формализация задачи оперативного планирования целевого функционирования разнотипных космических аппаратов дистанционного зондирования Земли // Труды МАИ, 2017, №96, [http://mai.ru/upload/iblock/8cc/Emelyanov\\_Malyshev\\_Smolyaninov\\_Starkov\\_rus.pdf](http://mai.ru/upload/iblock/8cc/Emelyanov_Malyshev_Smolyaninov_Starkov_rus.pdf)
37. Емельянов А.А., Малышев В.В., Нгуен Виет Хоай Нам, Старков А.В. Математическая модель функционирования наземного сегмента обработки данных ДЗЗ в части распределения процессов обработки // Научно-технический вестник Поволжья №2 2018 с.74-79

38. Емельянов А.А., Малышев В.В., Старков А.В., Гришанцева Л.А., Зубкова К.И., Зай Яр Вин Анализ и формирование показателей эффективности в задаче распределения потоков целевой информации при функционировании космических систем ДЗЗ // Научно-технический вестник Поволжья №8 2019, с. 28-31
39. Емельянов А.А., Малышев В.В., Старков А.В., Гришанцева Л.А., Зубкова К.И., Зай Яр Вин Результаты экспериментальной отработки математической модели распределения потоков целевой информации при функционировании космических систем ДЗЗ // Научно-технический вестник Поволжья №8 2019, с. 32-36
40. Зотов И.А., Костенко В.А. Алгоритм распределения ресурсов в центрах обработки данных с единым планировщиком для различных типов ресурсов // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. 2015. № 1. С. 61.
41. Занин К.А. Выбор орбитального построения космической системы дистанционного зондирования Земли по критериям качества информации / Космонавтика и ракетостроение. – №3(56), 2009. – с.152–161.
42. Занин К.А. Выбор параметров оптико–электронной космической системы наблюдения по качеству изображения / Полет. – М.: Машиностроение, 2007, №11. с.30–37.
43. Занин К.А. Оптимальное управление поддержанием относительного положения космических аппаратов в кинематически–правильных орбитальных группировках // Сборник научных трудов ФГУП «НПО им. с.А.Лавочкина» «Актуальные вопросы проектирования космических систем и комплексов».– М.: Изд–во «Блок–Информ–Экспресс». – 2005, выпуск № 6. – с.289–296.
44. Занин К.А., Малышев В.В. Алгоритм группового управления космическими аппаратами в кинематически–правильных орбитальных структурах // Космонавтика и ракетостроение. 2009. № 2 (55). с.138–146.

45. Занин К.А., Малышев В.В. Анализ эволюции орбитальных параметров навигационных систем ГЛОНАСС, GALILEO и GPS в длительном интервале эксплуатации // Космонавтика и ракетостроение. 2005. № 4 (41). с.112–121.
46. Занин К.А., Москатиный И.В. Выбор наилучшего размера элементов приемника изображения оптико–электронного комплекса космической системы наблюдения по критерию разрешающей способности / Полет. – № 4, 2009. – с.30–37.
47. Зинцов А.Е., Можаяев Г.В. Об одной задаче оптимизации движения системы спутников связи. // Задачи оптимизации сложных технических систем: Тематический сборник научных трудов МАИ. – М.: МАИ, 1990. – с.20–27.
48. Кристофидес Н. Теория графов: алгоритмический подход. – М.: Мир, 1978. – 432 с.
49. Кровотынцев В.А., Успенский С.А., Семериков А.Н., Леонов М.С. Наземный комплекс приёма, обработки и распространения информации «КАНОПУС-В» // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. 2015. Т. 148. № 5. с. 24-35.
50. Лебедев А.А. Введение в анализ и синтез систем. – М.: МАИ, 2001. – 352 с.
51. Лебедев А.А., Малышев В.В., Карп К.А. Системный анализ и управление в аэрокосмической технике. – М.: МАИ, 1995. – 52 с.
52. Лебедев А.А., Нестеренко О.П. Космические системы наблюдения. Синтез и моделирование. – М.: Машиностроение, 1991. – 224 с.
53. Лебедев А.А., Аджимамудов А.А., Баранов В.Н., Бобронников В.Т., Красильщиков М.Н., Малышев В.В., Нестеренко О.П. Основы синтеза систем летательных аппаратов. – М.: Машиностроение, 1996.
54. Лебедев А.А., Аджимамудов Г.Г. Основы синтеза систем летательных аппаратов: Учебник. – М., МАИ, 1996.
55. Лебедев А.А., Красильщиков М.Н., Малышев В.В. Оптимальное управление движением космических летательных аппаратов. – М.: Машиностроение, 1974.

56. Левитин А. В. Алгоритмы. Введение в разработку и анализ — М.: Вильямс, 2006. — С. 189–195. — 576 с. — ISBN 978-5-8459-0987-9
57. Лупян Е. А., Бурцев М.А., Прошин А. А., Кобец Д.А. Развитие подходов к построению информационных систем дистанционного мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 3. с. 53–66
58. Лупян Е.А., Саворский В.П. Базовые продукты обработки данных дистанционного зондирования земли // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 2. с. 87–96. М.: Машиностроение, 1990. – 256 с.
59. Маламед Е.Р. Конструирование оптических приборов космического базирования. СПб: ГИТМО (ТУ). –2002. – 291 с.
60. Малышев В.В., Бобронников В.Т., Дарнопых В.В., Шидловский А.В. Планирование целевого функционирования спутниковых систем мониторинга. Учебное пособие. – М.: МАИ, 2002. – 80 с.
61. Малышев В.В., Глазкова И.А. Дарнопых В.В. Оценка эффективности функционирования перспективной системы микроспутников ДЗЗ методом имитационного моделирования // Вестник. МАИ. 2009. №6. Т.16. с.125–134.
62. Малышев В.В., Красильщиков М.Н., Бобронников В.Т., Нестеренко О.П., Федоров А.В. Спутниковые системы мониторинга. – М.: МАИ, 2000. – 568 с.
63. Малышев В.В., Пиявский Б.С., Пиявский С.А. Метод принятия решений в условиях многообразия способов учета неопределенности // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. 2010. № 1. с. 46–61.
64. Малышев В.В., Старков А.В., Толстенков П.С., Фёдоров А.В. Методы поддержания параметров структуры высокоорбитальной группировки космических аппаратов для компенсации ухудшения её функциональных возможностей // Космонавтика и ракетостроение. ЦНИИмаш 2017. № 2 (95). С. 37-45.

65. Малышев В.В., Старков А.В., Федоров А.В. Методика актуализации банков данных объектов космического назначения // Вестник Московского Авиационного Института. Том 19. Выпуск №4, 2012
66. Малышев В.В., Старков А.В., Федоров А.В. Методика разработки программно-моделирующего комплекса для отработки средств проведения динамических операций космических аппаратов // Электронный журнал «Труды МАИ», 2012, № 57.
67. Малышев В.В., Старков А.В., Федоров А.В. Орбитальные коррекции космических аппаратов при выполнении динамических операций // Известия РАН. Теория и системы управления, 2013, №2, с.154-166.
68. Малышев В.В., Старков А.В., Федоров А.В. Программно-моделирующий комплекс для отработки средств проведения динамических операций космических аппаратов // Вестник компьютерных и информационных технологий, 2012, №9, Москва: Издательский дом «СПЕКТР», с. 7-12.
69. Малышев В.В., Старков А.В., Федоров А.В. Синтез оптимального управления при решении задачи удержания космического аппарата в орбитальной группировке // Космонавтика и ракетостроение, 2012, №4(69) . ЦНИИмаш, с. 150-158.
70. Малышев В.В., Чернов Д.Э. Планирование съемки наземных объектов системой автоматических искусственных спутников Земли. // Известия Академии наук. Сер. Теория и системы управления. – 1997, № 6. – с. 76–82.
71. Малышев В.В. Методы оптимизации в задачах системного анализа и управления: Учебное пособие. – М.: Изд-во МАИ–ПРИНТ, 2010.
72. Малышев В.В., Бобронников В.Т., Карп К.А., Нестеренко О.П., Федоров А.В. Пакеты прикладных программ для оптимизации и управления авиационно-космическими комплексами. В сб. «Системный анализ в технике-3». – М.: Изд-во МАИ, 1994.

73. Мальцев Е.А. Разработка алгоритмов обработки данных дистанционного зондирования земли для распознавания пространственных объектов сельскохозяйственного назначения с линейной геометрической структурой // автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук: 05.13.17 / Сиб. федер. ун-т. Красноярск, 2017
74. Марков Ю.Г., Михайлов М.В., Почукаев В.Н. Высокоточный прогноз орбит космического аппарата как результат рационального выбора возмущающих факторов // Доклады Академии наук. 2014. Т. 457. № 2. с. 170.
75. Методы системного анализа и исследования операций в задачах проектирования летательных аппаратов: учеб. пособие / В.В. Салмин, Кучеров А.С., Старинова О.Л., Прохоров А.Г. — Самара : Издательство СГАУ, 2007 .— 273 с. — ISBN 978-5-7883-0681-0
76. Моисеев Д.В. Линейное программирование целевого функционирования ИСЗ наблюдения Земли // Авиакосмическое приборостроение. 2003. № 2. с.19–24.
77. Назаренко А.И., Скребушевский Б.В. Эволюция и устойчивость спутниковых систем. – М.: Машиностроение, 1981.
78. Нормативный документ по стандартизации «Системы и комплексы космические. Термины и определения» Федерального космического агентства – № ОСТ 134–1020–2008. – 56 с.
79. Носенко Ю.И., Лошкарев П.А. Единая территориально–распределенная информационная система ДЗЗ – проблемы, решения, перспективы (часть 1) // Геоматика. 2009. № 4. с. 35–43.
80. Оперативное планирование целевого функционирования космических систем наблюдения и связи / В.В. Малышев, В.В. Дарнопых. - Москва : Издательство МАИ, 2017. - 294с. ISBN 978-5-4316-0444-7

81. Орлов В.П. Методы и алгоритмы оперативного контроля бортовых радиотехнических средств КА // автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук: 05.12.04 / Московский авиационный институт (государственный технический университет). Москва, 2002.
82. Основы синтеза систем летательных аппаратов / Под редакцией А.А. Лебедева. – М.: Машиностроение, 1996. – 440 с.
83. Панкратов И.А., Челноков Ю.Н. Аналитическое решение дифференциальных уравнений ориентации круговой орбиты космического аппарата, Изв. Сарат. ун-та. Нов. сер. Сер. Математика. Механика. Информатика, 2011, том 11, выпуск 1, с. 84–89
84. Полищук Г.М. Многоцелевая космическая система «Арктика» // Обеспечение комплексной безопасности северных регионов Российской Федерации. Материалы научно–практической конференции 22 апреля 2008 г. М.:НЦУКС МЧС России. – 2008.
85. Применение космических технологий для развития арктических регионов: сборник материалов Всероссийской конференции с международным участием [Электронный ресурс] / С.В. Рябченко, Л.В. Соколова .— 2014 .— 252 с. : ил. — ISBN 978-5-261-00903-0
86. Разумный Ю.Н., Самусенко О.Е., Нгуен Н. О задаче оптимизации орбитальной структуры многоярусных спутниковых систем непрерывного обзора околоземного пространства // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2018. № 4 (697). с. 68-79.
87. Райкунов Г.Г., Колесников Н.П., Бетанов В.В. К вопросу решения обобщенных некорректных задач определения движения сложных динамических объектов // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. 2014. Т. 1. № 2. с. 3-14.

88. Райкунов Г.Г., Власов Ю.В., Панов Д.В. Основные направления научно-технологического развития организаций ракетно-космической промышленности в обеспечение реализации стратегии космической деятельности России до 2030 г // Экономика и управление: проблемы, решения. 2017. Т. 4. № 5-1. с. 10-18.
89. Райкунов Г.Г., Денисов Ю.В., Трофимов Д.М., Шуваева М.К. Дистанционные методы поисков месторождений нефти и газа на морских акваториях— М.: Инфра-Инженерия, 2017.— 68 с.
90. Решетнев М.Ф., Лебедев А.А., Бартенев В.А. и др. Управление и навигация искусственных спутников земли на околокруговых орбитах. М.: Машиностроение. 1988. 336 с.
91. Салмин В.В. Оптимизация космических перелетов с малой тягой. – М.: Машиностроение, 1987.
92. Серапинас Б. Б. Геодезические основы карт. Учебное пособие. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 2001.-132 с.
93. Селин В.А., Емельянов А.А. Российская космическая система ДЗЗ. Базовые принципы развития // XXII международная научная конференция «Системный анализ, управление и навигация»: Тезисы докладов. Сборник. М.: Изд-во МАИ-ПРИНТ, 2017, с. 17-18.
94. Скребушевский Б.С. Формирование орбит космических аппаратов. - М.: Машиностроение, 1990. - 256 с.
95. Скребушевский Б.С. Управление полетом беспилотных космических аппаратов. – М.: «Владмо», 2003.
96. Современные технологии обработки данных дистанционного зондирования Земли / Под ред. В.В. Еремеева. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2015. – 460 с.
97. Соловьев В.А., Лысенко Л.Н., Любинский В.Е. Управление космическими полетами. Учебное пособие в 2-х частях. – М.: Изд-во МГТУ им.Н.Э.Баумана, 2009.

98. Старков А.В. Синтез алгоритмов управления космическими аппаратами с учетом требований безопасности проведения динамических операций// автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук: 05.07.09 / Московский авиационный институт (национальный исследовательский технический университет). Москва, 2012.
99. Сухой Ю.Г. Коррекции орбит геостационарных спутников: В 3-х частях. Часть 1. Особенности управления орбитальным движением и возмущения орбит геостационарных спутников: Пособие для специалистов. – М: Издательство «Спутник+», 2011.
100. Твердохлебова Е.М., Сморшко И.А., Сорокин А.Л. Оценка возможностей орбитальной группировки КА ДЗЗ в период с 2017 по 2025 год // XXII международная научная конференция «Системный анализ, управление и навигация»: Тезисы докладов. Сборник. М.: Изд-во МАИ-ПРИНТ, 2017, с. 78-79.
101. Тюлин А.Е., Селин В.А., Емельянов А.А. Актуализация приоритетов развития отечественной отрасли дистанционного зондирования земли из космоса // XXIII международная научная конференция «Системный анализ, управление и навигация»: Тезисы докладов. Сборник. М.: Изд-во МАИ-ПРИНТ, 2018, с. 17-18.
102. Токарева О.С. Обработка и интерпретация данных дистанционного зондирования Земли: учебное пособие / О.С. Токарева ; Национальный исследовательский Томский политехнический университет. - Томск : Изд-во ТПУ, 2010. - 148 с.
103. Усовик И.В., Дарнопых В.В. Автоматизированный программный комплекс для параметрического анализа и оптимизации планирования целевого функционирования космических систем ДЗЗ / Электронный журнал "Труды МАИ". – № 65, 2013

104. Федоров А.В. Программирование задач моделирования и оптимизации на языке Object Pascal : Учеб. пособие / А. В. Федоров; М-во образования Рос. Федерации. Моск. гос. авиац. ин-т (техн. ун-т). - М. : Изд-во МАИ, 2001. - 111 с. : ил.; 20 см.; ISBN 5-7035-2507-1
105. Федоров А.В., Ахрамович С.А., Закиров А.Ю. Синтез оптимального управления высокоэллиптического космического аппарата с использованием бикватернионов // XIII Международная научная конференция «Системный анализ, управление и навигация»: Тезисы докладов. Сборник. М.: Изд-во МАИ-ПРИНТ, 201, с. 130–132, ISBN 978-5-4465-1856-2
106. Чандра А.М., Гош с.К. Дистанционное зондирование и географические информационные системы. М.: Техносфера, 2008. 312 с.
107. Челноков Ю.Н. Кватернионные и бикватернионные модели и методы механики твердого тела и их приложения. Геометрия и кинематика движения. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. – 512 с. – ISBN 5–9221–0680–5.
108. Чермошенцев А.Ю. Оценка измерительных свойств космических снимков высокого разрешения // автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук: 25.00.34 / Сибирская государственная геодезическая академия. Новосибирск, 2012
109. Чернов А.А., Чернявский Г.М. Орбиты спутников дистанционного зондирования Земли. Лекции и упражнения. – М.: Радио и связь, 2004. – 200 с.
110. Чернявский Г.М., Бартенев В.А. Орбиты спутников связи. – М.: Связь, 1978. – 240 с.
111. Чернявский Г.М., Бартенев В.А., Малышев В.А. Управление орбитой стационарного спутника. – М.: Машиностроение, 1984.
112. Emelianov A.A., Grishantseva L.A., Zubkova K.I., Malyshev V.V., Nguyen Viet Hoai Nam, Starkov A.V., Zay Yar Win. Mathematical model of ERS data processing ground segment operation in terms of processing distribution // Advances in the Astronautical Sciences. CA, USA: Univelt Inc., 2019. Vol. 168.

113. Malyshev V. V., Starkov A. V., Fedorov A. V. Formation Keeping Strategy for a Quasi-Zenith GLONASS Complement // *Advances in the Astronautical Sciences*. Volume 161, 2017, p.1129-1140
114. Malyshev V.V., Starkov A.V., Fedorov A.V.. Orbital Corrections of Space Vehicles while Performing Dynamic Operations // *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 2013, Vol. 52, No. 2, pp. 313–325.
115. Malyshev V.V., Starkov A.V., Zay Yar Win. The Decision of Problems of Evasion When Holding the Geostationary Satellites in the Neighborhood of The Reference Orbit // *Journal of Advanced Research in Dynamical and Control Systems*, Vol. 10, 13-Special Issue, 2018, Pages: 53-58
116. Zay Yar Win, Malyshev V.V., Bobronnikov V. T., Starkov A.V. The joint solution of problem of evasion and keeping in a neighborhood reference orbit // *Advances in the Astronautical Sciences*. CA, USA: Univelt Inc., 2019. Vol. 168.
117. <http://www.ntsomz.ru>
118. <http://www.roscosmos.ru>
119. <http://russianspacesystems.ru>
120. <http://www.planet.iitp.ru>
121. <http://www.sovzond.ru/>
122. <http://www.scanex.ru/>