

УДК 629.783

**Автоматизированный программный комплекс для параметрического анализа и оптимизации планирования целевого функционирования космических систем ДЗЗ**

Усовик И. В.\*, Дарнопых В. В.\*\*

*Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), МАИ,  
Волоколамское шоссе, 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993, Россия*

*\*e-mail: usovikiv@mail.ru*

*\*\*e-mail: darnopykh@mail.ru*

**Аннотация**

Целью данной работы является разработка автоматизированного программного комплекса для полного анализа функционирования систем ДЗЗ как на этапе проектирования, так и на этапе эксплуатации спутниковых систем.

Первым этапом работы являлась разработка концепции автоматизированного программного комплекса, а также разработка программного обеспечения для различного вида анализа систем ДЗЗ. На данном этапе был разработан интерфейс программы, разработаны модули с различными моделями для оценки эффективности функционирования, а так же произведена отладка работы программного комплекса.

Вторым этапом работы было проведение анализа функционирования спутниковой различных спутниковых систем. Был проведён подробный анализ функционирования 3-х спутниковых систем ДЗЗ.

Результатом выполненной работы является программный комплекс, позволяющий проводить моделирование функционирования спутниковых систем ДЗЗ, а также результаты анализа некоторых систем ДЗЗ.

Статья подготовлена с использованием результатов научных исследований, проводимых авторами при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 11-08-01278-а).

**Ключевые слова**

космические системы, дистанционное зондирование Земли, орбитальные группировки, параметрический анализ, моделирование, оптимизация, программный комплекс, анализ эффективности

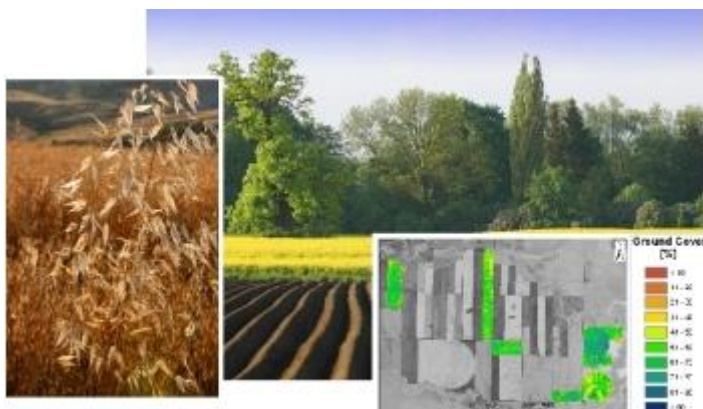
## Введение

В настоящее время использование данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) находит применение в самых различных отраслях: от поиска полезных ископаемых до сельского хозяйства. В связи с увеличением числа потребителей данной информации, в настоящее время идёт процесс, направленный на создание многофункциональных спутниковых систем ДЗЗ, состоящих из нескольких космических аппаратов (КА). Эффективность использования таких систем зависит от числа КА, их орбитальных параметров, характеристик бортовой аппаратуры, влияния факторов внешней среды и т.д. Ограниченные возможности по получению, хранению и оперативной передаче больших объемов информации полученной в результате ДЗЗ обуславливают необходимость решения задачи выбора оптимальных проектных параметров, удовлетворяющих всем заданным требованиям и ограничениям.

В работе представлен автоматизированный программный комплекс для параметрического анализа и оптимизации планирования целевого функционирования космических систем ДЗЗ, представлены результаты анализа основных целевых параметров функционирования спутниковых систем ДЗЗ, состоящих из одного и нескольких КА, а также результаты анализа функционирующей уже сегодня спутниковой системы Метеор-МЗ. Результаты были получены с использованием программного комплекса, разработанного для решения этой и других задач.

### 1. Задачи, решаемые с использованием данных ДЗЗ

С начала исследований ОКП использование систем ДЗЗ получило широкое применение. Целями использования таких систем является получение полного представления о Земле и процессах проходящих на ее поверхности, в атмосфере, гидросфере, ионосфере, магнитосфере и т.д. Как показывает опыт, использование средств ДЗЗ позволяет решать целый ряд различных задач: от предсказания погоды до прогнозирования чрезвычайных ситуаций.

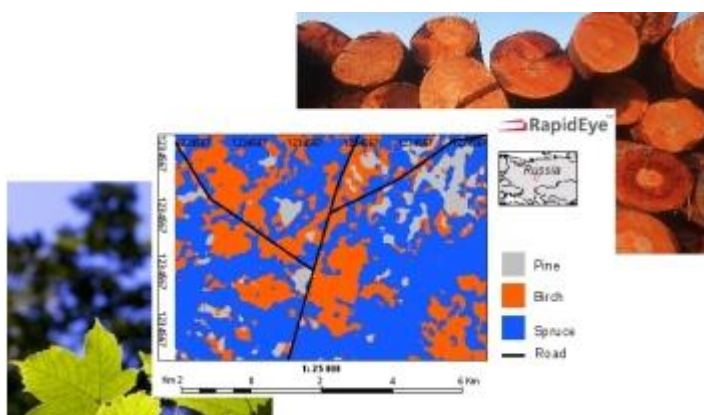


#### Сельское хозяйство

В сельскохозяйственном производстве для принятия своевременных и обоснованных решений очень важна информация о текущем состоянии посевов.

*Данные дистанционного зондирования наиболее эффективны для решения следующих задач в сфере сельского хозяйства:*

- Определение категорий типов сельскохозяйственных посевов (зерновые, масличные, технические, овощные и др.).
- Текущий контроль за состоянием сельскохозяйственных посевов, оценка всхожести, засоренности, степени спелости сельскохозяйственных культур; раннее прогнозирование характеристик урожайности тех или иных культур на базе текущего состояния посевов.
- Полный мониторинг темпов уборки урожая одновременно на территории целых регионов, получение независимой и объективной статистической информации об объемах продуктов растениеводства, собранных в тех или иных хозяйствах в целях устранения случайных или преднамеренных искажений официальной статистики, укрытия доходов, совершенствования налогообложения.
- Выявление и прогнозирование неблагоприятных явлений, связанных с сельскохозяйственным природопользованием (ветровая и водная эрозия, засоление, стравливание растительности, вытаптывание почвогрунтов скотом и т.д.) в целях учета этих процессов при планировании сельскохозяйственного природопользования.
- Изучение природных условий, способствующих, или препятствующих активной сельскохозяйственной деятельности (выявление плоских заболоченных участков, резких перегибов рельефа и т.п. с применением цифрового рельефа местности (ЦМР)).



### **Лесное хозяйство**

Данные ДЗЗ все больше используются для инвентаризации лесов, определения воздействий на лесной покров природных факторов и лесохозяйственной деятельности.

*Данные ДЗЗ в лесном хозяйстве*

*наиболее эффективны для решения следующих задач:*

- Определение категорий (лиственные, хвойные) и породного состава лесов.
- Подразделение лесов на категории по возрасту, степени спелости, запасу древесной массы, биологической продуктивности по снимкам, как с использованием полевых эталонных данных, так и по существующим эталонам.

- Выявление существующих вырубок и гарей, оперативный автоматизированный мониторинг появления новых вырубок и гарей, определение экономического и экологического ущерба.
- Выявление и прогнозирование неблагоприятных явлений, оказывающих влияние на лесные массивы (влияние вредителей и болезней, процессы иссушения или переувлажнения лесов, приводящие к их деградации и гибели), в целях учета этих процессов при планировании лесного природопользования.
- Изучение природных условий, способствующих, или препятствующих активной лесохозяйственной деятельности (выявление плоских заболоченных участков, резких перегибов рельефа и т.п. с применением ЦМР).



### **Нефтегазовый комплекс, энергетика, телекоммуникации**

Нефтегазодобывающие и электроэнергетические компании имеют в своем распоряжении обширные сети трубопроводов, линий электропередачи и другие объекты инфраструктуры. Защита этих объектов - важная задача отрасли.

*Данные ДЗЗ наиболее эффективны для решения следующих задач в данных сферах:*

- Планирование и контроль развития инфраструктуры добычи, транспортировки и переработки нефти и газа.
- Мониторинг появления техногенных объектов в охранных зонах.
- Картографирование мест сжигания попутного газа и контроль функционирования факельных установок.
- Мониторинг экологического состояния территорий в районах добычи, переработки, транспортировки нефти и газа. Выявление, картографирование и мониторинг состояния шламовых амбаров, кустовых площадок и прилегающих к ним ландшафтов.
- Выявление территорий, загрязненных нефтепродуктами, мониторинг аварийных разливов нефти, контроль темпов и оценка эффективности рекультивационных мероприятий.
- Мониторинг электрических сетей.

- Выявление мест повреждений трубопроводов и линий электропередачи.
- Планирование развития телекоммуникационных сетей.



### **Тематическое и специальное картографирование**

Для того чтобы карты отвечали потребительским запросам они должны быть максимально актуальными. В нашем быстро меняющемся мире постоянно требуется обновленная пространственная информация, получаемая путем наблюдения за Землей из космоса.

*Данные ДЗЗ наиболее эффективны для решения следующих задач картографии:*

- Мониторинг изменений ландшафта и оперативное их картографирование
- Обновление дорожных, навигационных и других специальных карт.



### **Муниципальное управление и территориальное планирование**

В настоящее время на территории РФ осуществляется работы по разработке градостроительной документации. Очевидно, что в современных условиях качественную и достоверную

информацию для решения задач муниципального управления и территориального планирования возможно получить по данным ДЗЗ.

*Данные ДЗЗ наиболее эффективны для решения следующих задач в данной сфере:*

- Обновление топографо-геодезической подосновы для корректировки генеральных планов перспективного развития городов, схем территориального планирования субъектов Российской Федерации, муниципальных районов.
- Вычленение в рамках генерального планирования городов и поселений, функциональных зон и подзон (общественно-деловой, производственной, жилой и иных, предусмотренных ГК РФ) на базе дешифрирования космических снимков.
- Анализ производственных зон городов и поселений в рамках разработки схемы ограничений и земель с особыми условиями градостроительного развития, выделение санитарно-защитных зон производств различного класса опасности, зафиксированных

с целью определения ареалов потенциального риска, которому подвергается население.

- Оценка инвестиционной емкости и градостроительной пригодности территорий нового освоения, в частности на базе дешифрирования по космоснимкам характера и степени развития неблагоприятных экзогенных процессов, таких как эрозия, подтопление, заболачивание и т.д.
- Разработка на базе космических снимков ландшафтных планов любого уровня, в целях защиты интересов природного комплекса города или района.



### Экология и охрана окружающей среды

Ученые отмечают существенное изменение климата и увеличение количества стихийных бедствий в последние десятилетия. В результате этого во всем мире обостряются экологические проблемы. Все больше государственным органам и организациям, а также коммерческим компаниям необходима информация о степени воздействия на определенные территории природных и техногенных факторов.

*Космические снимки наиболее эффективны для решения следующих задач:*

- Двойное дешифрирование космических снимков: выявление, как источников загрязнения, так и последствий их воздействия на экосистемы.
- Изучение эрозионных процессов (водных и ветровых) – масштаба проявления и темпов развития.
- Автоматический мониторинг и прогнозирование процессов заболачивания и опустынивания, засоления, всех видов карста, береговых геоморфологических процессов.
- Наблюдение практически в режиме реального времени за быстроизменяющимися экосистемами и антропогенными объектами (расширение городов, промзон, транспортных магистралей, пересыхающих водоемов и т.п.).
- Определение экологической комфортности территории, синтетическая оценка экологического состояния регионов.
- Изучение экологического состояния атмосферы по ранневесенним снимкам (выявление запыленности и загазованности по загрязнению снегового покрова).



### Управление чрезвычайными ситуациями

Мониторинг зон стихийных бедствий и организация спасательных и восстановительных работ — важнейшие задачи в современном мире.

*Космические снимки наиболее эффективны для решения следующих задач:*

- Мониторинг чрезвычайных ситуаций, связанных с природными и техногенными воздействиями.
- Изучение транспортной доступности в пределах тех или иных территорий по данным ДЗЗ и дополнительным материалам.
- Планирование аварийно-спасательных работ в районах стихийных бедствий и антропогенных катастроф.

## **2. Структура низкоорбитальных космических систем ДЗЗ (КС ДЗЗ)**

Для того чтобы иметь возможность решать задачи, перечисленные в разделе 1, необходимо спроектировать и разработать КС ДЗЗ. Данные системы можно разделить на два больших класса: системы на геостационарных орбитах и системы расположенные на низких орбитах. Далее мы будем рассматривать низкоорбитальные системы. Данные системы в основном функционируют на солнечно-синхронных орбитах, т.к. спутник, находящийся на такой орбите, проходит над любой точкой земной поверхности приблизительно в одно и то же местное солнечное время. На данных орбитах съемка проводится при одинаковых условиях освещенности снимаемой поверхности, что является одним из важных факторов при обработке снимков и получении из них полезной информации.

Современные космические системы ДЗЗ состоят из нескольких основных подсистем, каждая из которых тоже состоит из множества других подсистем. На рисунке 1, представлена схема состава спутниковой системы ДЗЗ.

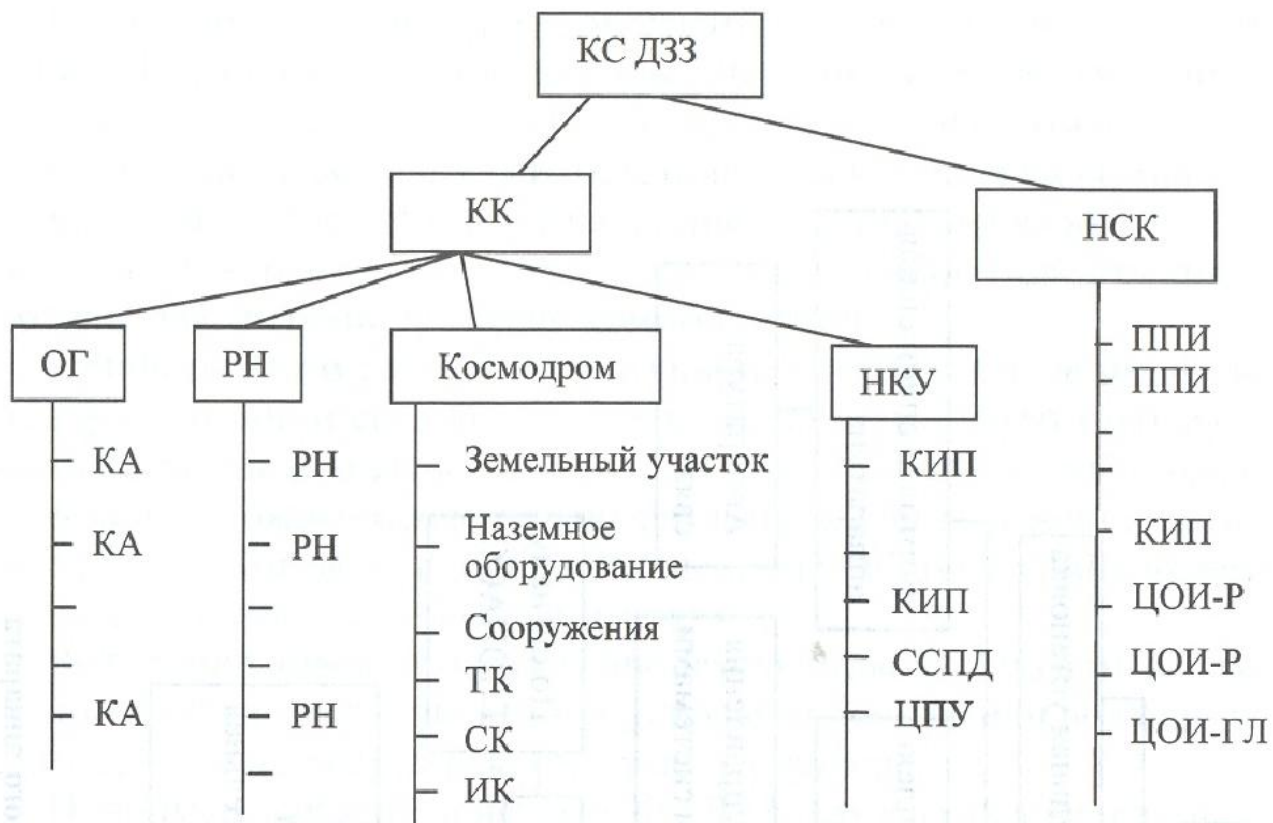


Рис. 1 Структурная схема состава системы ДЗЗ [1]

Рассмотрим подробнее целевое назначение каждого из элементов спутниковой системы ДЗЗ с использованием основного положения системного анализа, которое говорит, что сложная система – это система, состоящая из множества систем и элементов, взаимодействующих друг с другом и окружающей средой, для достижения общей для всей системы цели. Иерархия функций компонентов КС ДЗЗ по уровням членения системы на подсистемы представлена на рисунке 2.



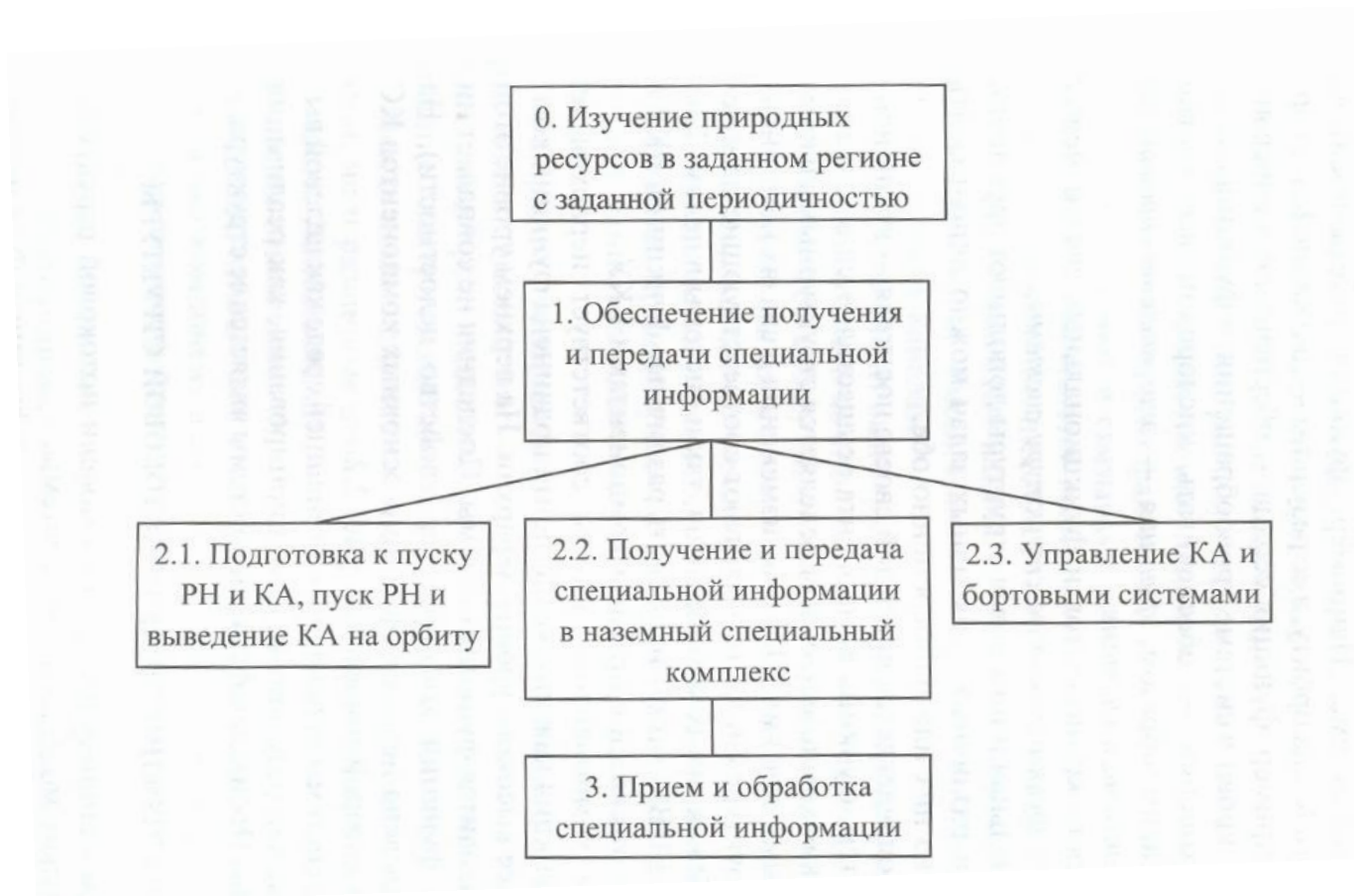


Рис.2 Иерархия функций компонентов КС ДЗЗ [1]

Основной целью функционирования КС ДЗЗ является получение снимков из космоса в различных диапазонах длин волн электромагнитного излучения с требуемой периодичностью. Под периодичностью здесь и далее будем подразумевать интервал времени между получением снимков заданной территории на Земле.

Для того чтобы КС ДЗЗ выполняла свою основную задачу необходимо обеспечение получения и специальной информации. Таким образом, КС ДЗЗ можно представить как совокупность космического комплекса (КК) и наземного специального комплекса (НСК). КК выполняет функции по получению и передаче информации, НСК выполняет функции приема и обработки передаваемой с КК информации. В свою очередь КК и НСК состоят из подсистем, обеспечивающих выполнение их функции.

КК состоит из: орбитальной группировки (ОГ), которая состоит из КА, основной функцией которых является проведение съемки и передача информации на землю; ракетоносителей и космодрома, которые обеспечивают вывод КА на заданные орбиты, наземного комплекса управления (НКУ), с использованием которого происходит управление КА, планирование работы бортовой аппаратуры.

НСК состоит из пунктов приема информации (ППИ), которые получают информацию с КА, контрольно измерительных пунктов (КИП), производящих измерения, и центров обработки информации (ЦОИ), в которых производится тематическая обработка полученной информации для решения различных задач.

На основании системного анализа можно выявить следующие основные целевые параметры функционирования КС ДЗЗ – это получение информации с определенной территории поверхности земли (или над определённой частью территории), с заданными параметрами получаемой информации, с заданной периодичностью.

Исходя из этого положения, можно записать укрупненное выражение для оценки качества функционирования низкоорбитальных КС ДЗЗ в общем виде:

$$Y = f(X) \quad (1)$$

$Y$  – вектор целевых параметров,  $X$  – вектор проектных параметров.

$Y = [p, \tau, r, \Delta l, S \dots]^T$ , где  $p$  – периодичность наблюдений,  $\tau$  – оперативность получения информации на ППИ (время между съемкой и сбросом информации),  $r$  – пространственная разрешающая способность,  $\Delta l$  – радиометрическая (яркостная, температурная ит.п.) разрешающая способность,  $S$  – характеризует территорию, с которой получена информация.

$X = [N, h, i, \Omega, \varphi, D, \lambda, V, W, P \dots]^T$ , где  $h$  – высоты полета спутников,  $i$  – наклонения орбит спутников,  $\Omega$  – долготы восходящих узлов спутников,  $\varphi$  – углы обзора целевой аппаратуры,  $D$  – размер апертуры целевой аппаратуры,  $\lambda$  – диапазон длин волн, в которых работает спутниковая аппаратура,  $V$  – объем памяти для хранения информации на борту КА,  $W$  – скорость передачи информации на землю,  $P$  – параметры расположения пунктов приема информации на Земле. Далее на рисунке 3 представлены требования по периодичности и пространственному разрешению в зависимости от решаемых задач по исследованию глобальных геологических и геофизических процессов. Для каждой из представленных задач существуют известные требуемые параметры длин волн, в которых надо проводить измерения для их решения.

Интуитивно понятно, что при сравнении систем ДЗЗ лучшей будет та, которая позволяет получать данные с наименьшей периодичностью наблюдений (т.е. которая чаще наблюдает одну и ту же территорию), с наилучшей пространственной и радиометрической разрешающей способностью при заданных ограничениях на число КА, параметры аппаратуры и т.д.

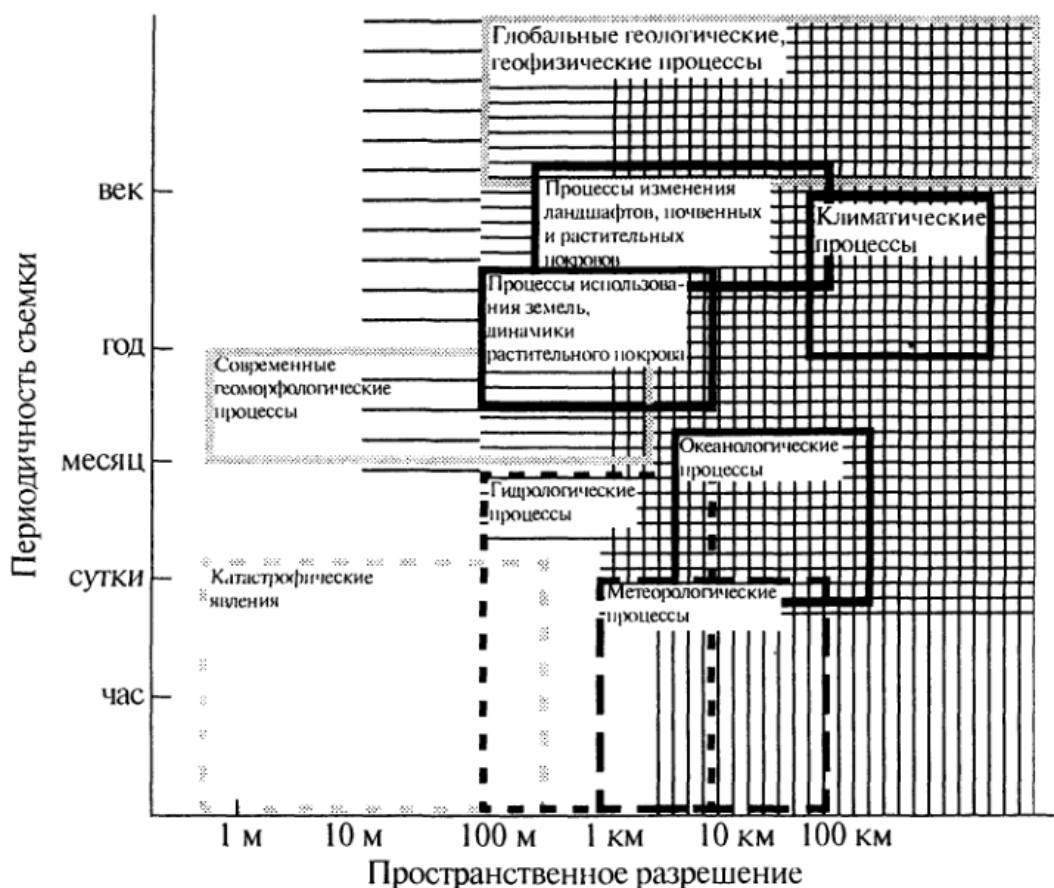


Рис. 3 Требования к периодичности съемки и пространственному разрешению в зависимости от задач, связанных с глобальными геологическими и геофизическими процессами [4]

Зависимости пространственной способности можно приблизительно оценить с использованием следующей формулы [4]:

$$r \sim \frac{\lambda}{D} h \quad (2)$$

Радиометрическая разрешающая способность определяется, прежде всего шириной динамического диапазона используемого датчика, то есть количеством уровней дискретизации, соответствующих переходу от абсолютно «черного» к абсолютно «белому» телу. Для радиометрической способности можно записать следующее соотношение: для обнаружении элементарного объекта должно выполняться условие:

$$I_{об} \frac{S}{r^2} > \Delta I(3),$$

где  $I_{об}$  — яркость объекта,  $S$  — его площадь.

Радиометрическая и пространственная разрешающая способность, являются функцией высоты полета и параметров аппаратуры.

Параметры  $p, \tau$  – являются функцией баллистического построения системы и зоны обзора спутниковой аппаратуры. Примерные зависимости оперативности приема информации и пространственного разрешения от высоты.

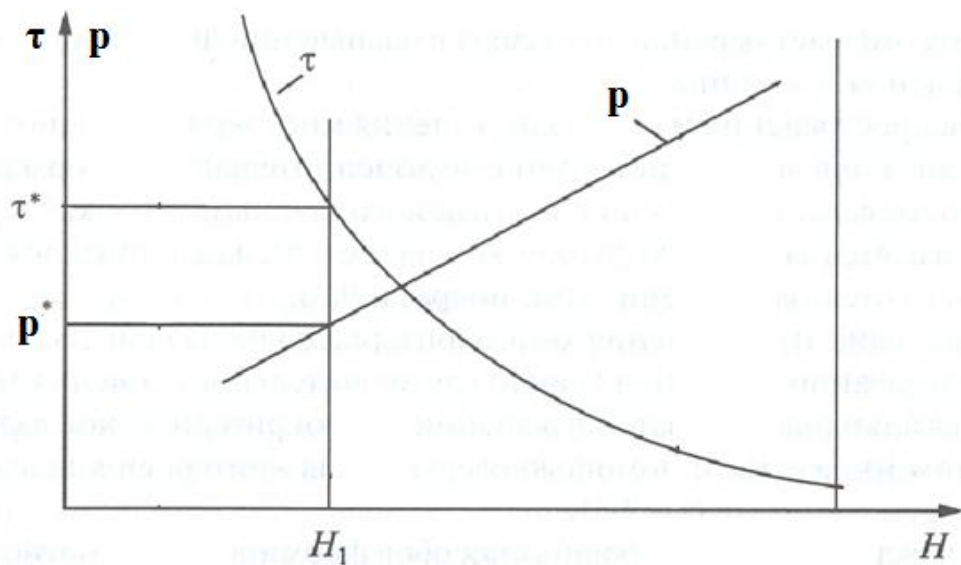


Рис. 4 Общий вид зависимости периодичности наблюдений и разрешающей способности от высоты орбиты спутника [4].

При некоторых заданных ограничениях можно найти оптимальное сочетание параметров периодичности наблюдений, оперативности и разрешающей способности. На практике, чаще всего требуемые параметры по пространственной и радиометрической разрешающей способности задаются в виде ограничений, которые определяются решаемой задачей, поэтому задача оптимизации построения космического сегмента системы может быть поставлена в виде минимизации периодичности наблюдений, или максимизации оперативности приема информации при заданных ограничениях на другие целевые параметры.

### 3. Постановка задачи оптимизации

При проектировании спутниковых систем ДЗЗ можно поставить следующую задачу оптимизации для вектора  $Y$ :

$$J = p(N^*, h^*, i^*, \varphi^*) \rightarrow \min \quad (4)$$

$$\tau \leq \tau^*$$

$$r \leq r^*$$

$$S = S^*$$

параметры аппаратуры, требования к радиометрической разрешающей способности, и к освещенности наблюдаемой поверхности заданы:  $\Omega = \Omega^*, D = D^*, \lambda = \lambda^*, V = V^*, W = W^*, P = P^*, \Delta l = \Delta l^*$ .  $i$ -выбирается таким образом, чтобы орбита была солнечно-синхронной. Зависимость наклона и большой полуоси  $a$  орбиты спутника выглядит следующим образом [3]:

$$i = \text{ArcCos} \left( - \left( \frac{a}{12352.54} \right)^{7/2} \right) \quad (5)$$

Таким образом, основными варьируемыми параметрами будут являться:  $N, h, \varphi$ .

Функция  $p$  является нелинейной, и для ее расчета применяется специальная методика расчета, основанная на моделировании функционирования системы ДЗЗ, которая будет описана далее. Набор используемых методик и моделей был описан в статье [6]

#### 4. Описание программного комплекса для анализа и оптимизации КС ДЗЗ

Для решения задач связанных с выбором проектных параметров КС ДЗЗ был разработан специализированный программный комплекс, состоящий из набора моделей описанных в статье [6]. Процесс моделирования и расчетов помимо получения результатов сопровождается 3d визуализацией для контроля процесса моделирования.

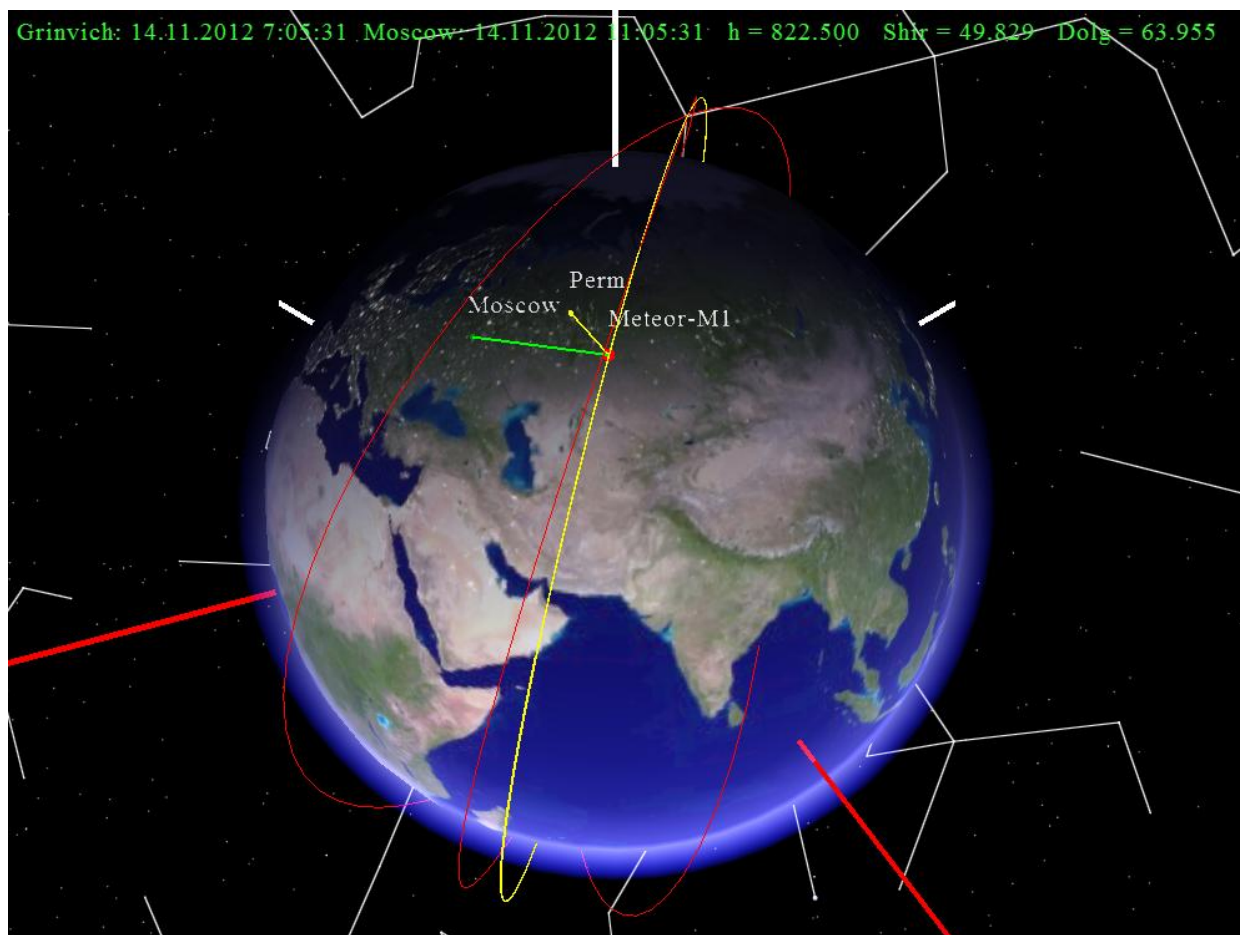


Рис. 5 Рабочая область программы с визуализацией процесса моделирования

На рисунке 5 представлена рабочая область программы с визуализацией процесса моделирования, на ней изображена орбита спутника Метеор-М1 в инерциальной(оси системы координат изображены белым цветом, орбита желтым цветом) и Гринвичской системах координат (оси системы координат изображены красным цветом, орбита красным цветом). Во время пролета спутника над заданным объектом, спутник и объект соединяются желтой линией, во время сеанса передачи данных на ППИ спутник и ППИ соединяются зелёной линией.



Рис. 6 Окно программы для баллистического анализа

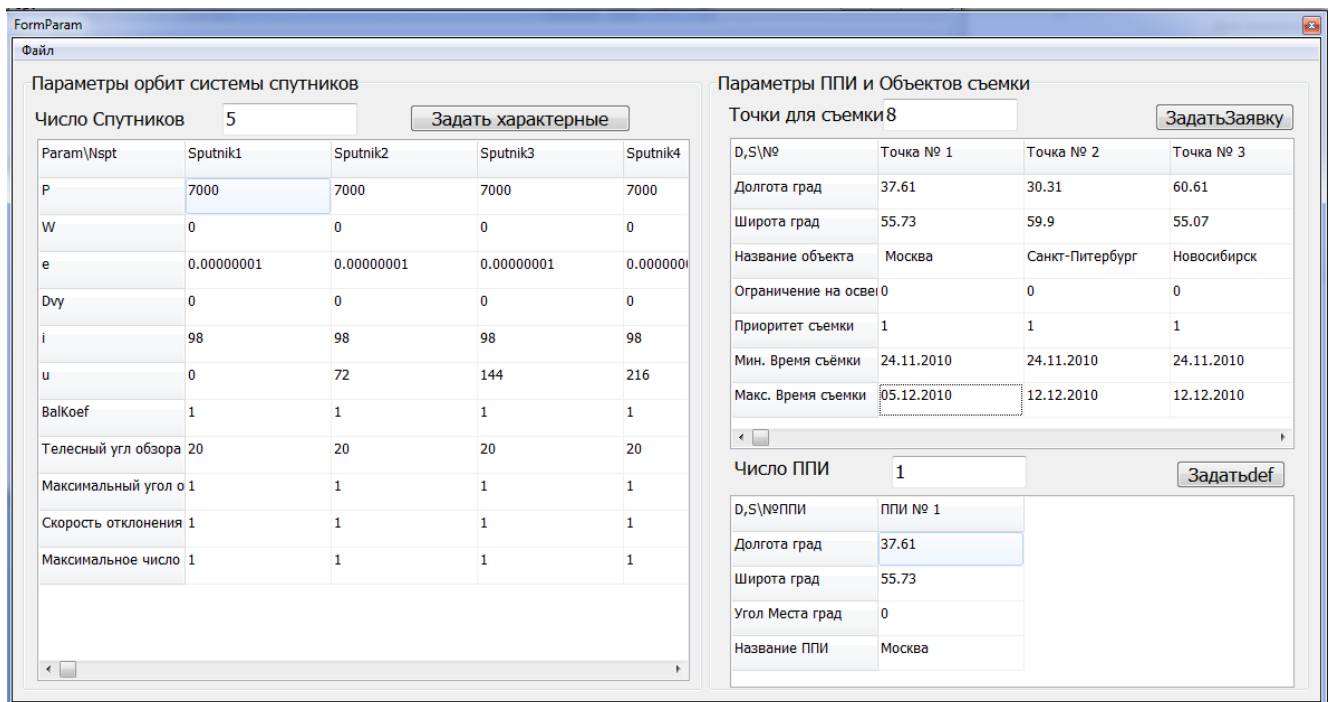


Рис. 7 Окно программы с параметрами, используемыми для моделирования

## **5. Анализ периодичности съемки системы ДЗЗ из одного спутника в зависимости от варьируемых параметров**

Для выбора наилучшей системы при заданных ограничениях, по заданному критерию было проведено моделирование для различных вариантов высот спутника и различных углах обзора спутниковой аппаратуры. Угол обзора аппаратуры задается через угол между линией горизонта и линией зоны обзора аппаратуры  $\gamma$ , изображенным на рис. 7.

Угол  $\gamma$  равен 0, когда спутниковая аппаратура имеет большое значение угла зоны обзора и стремится к 90 град когда аппаратура имеет маленький угол зоны обзора. Решения получались для следующих значений высот и значений угла  $\gamma$ :

$$h = 200, 400, 600, 800, 1000, 1200, 1400, 1600 \text{ [км]}$$

$$\gamma = 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60 \text{ [град]}$$

Результаты моделирования представлены на рисунках 9-14.

После проведения моделирования были получены следующие результаты:

- зависимости средней периодичности съемки как функции широты объекта наблюдения, высоты и обзора аппаратуры,
- зависимость среднего, минимального, максимального времени между съемкой и приемом информации.

Практическое использование полученных графиков заключается в следующем: при заданных ограничениях можно построить в пространстве периодичности некоторую поверхность, которая задает ограничения как функцию периодичности. Пересечение данной поверхности с функцией периодичности, сразу определяет нам множество вариантов, из которых можно в дальнейшем простым сравнением определить лучший.



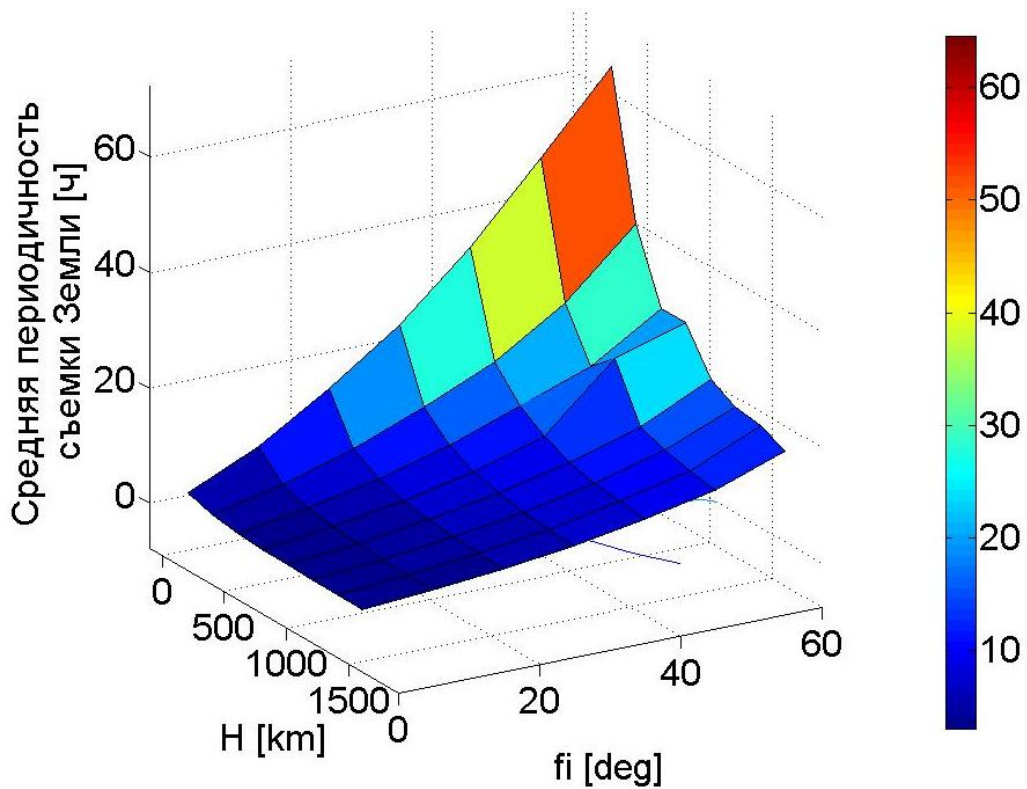


Рис. 8 Зависимость средней периодичности съёмки от высоты спутника и угла обзора аппаратуры

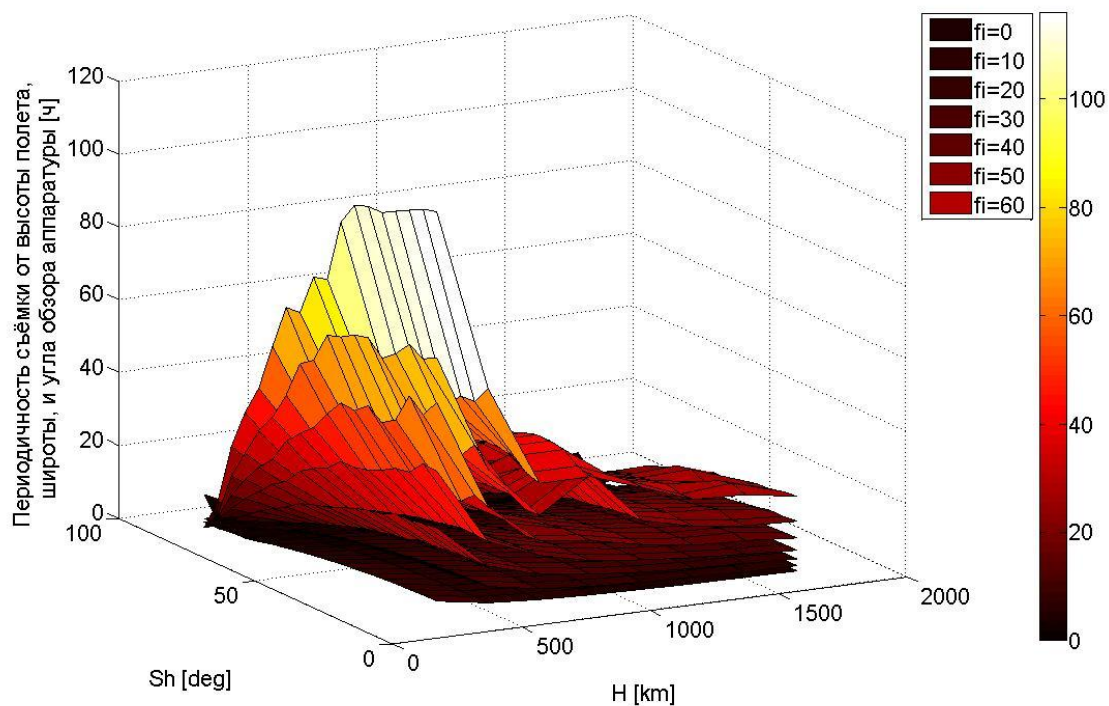


Рис.9 Зависимость средней периодичности съёмки от широты, угла обзора аппаратуры и высоты полета спутника.

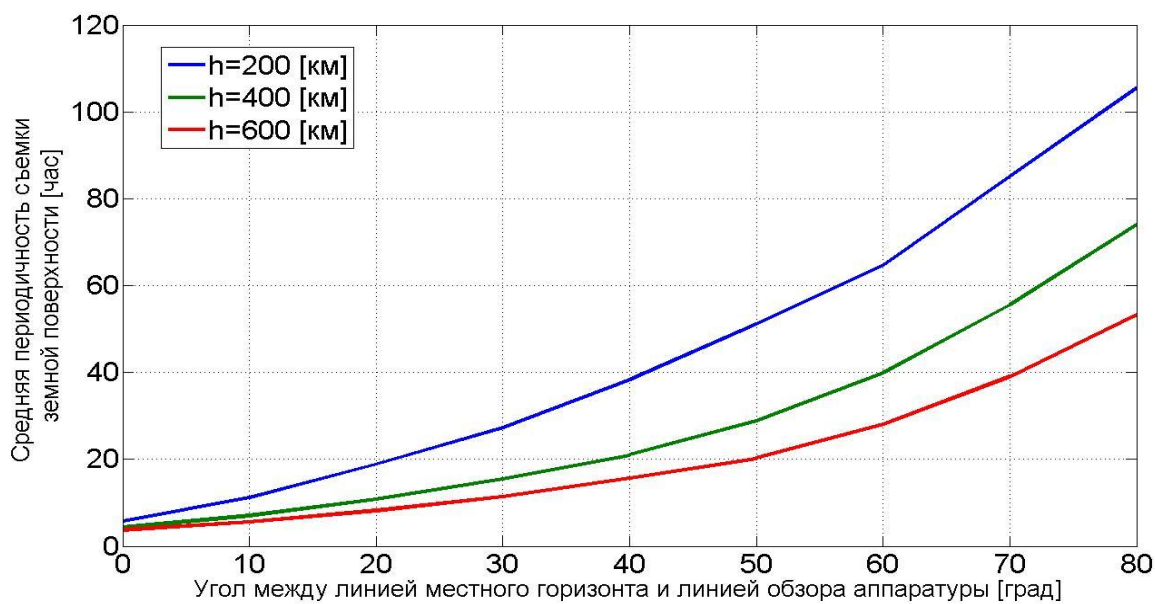


Рис.10 Зависимость средней периодичности съемки от высоты спутника и угла обзора аппаратуры

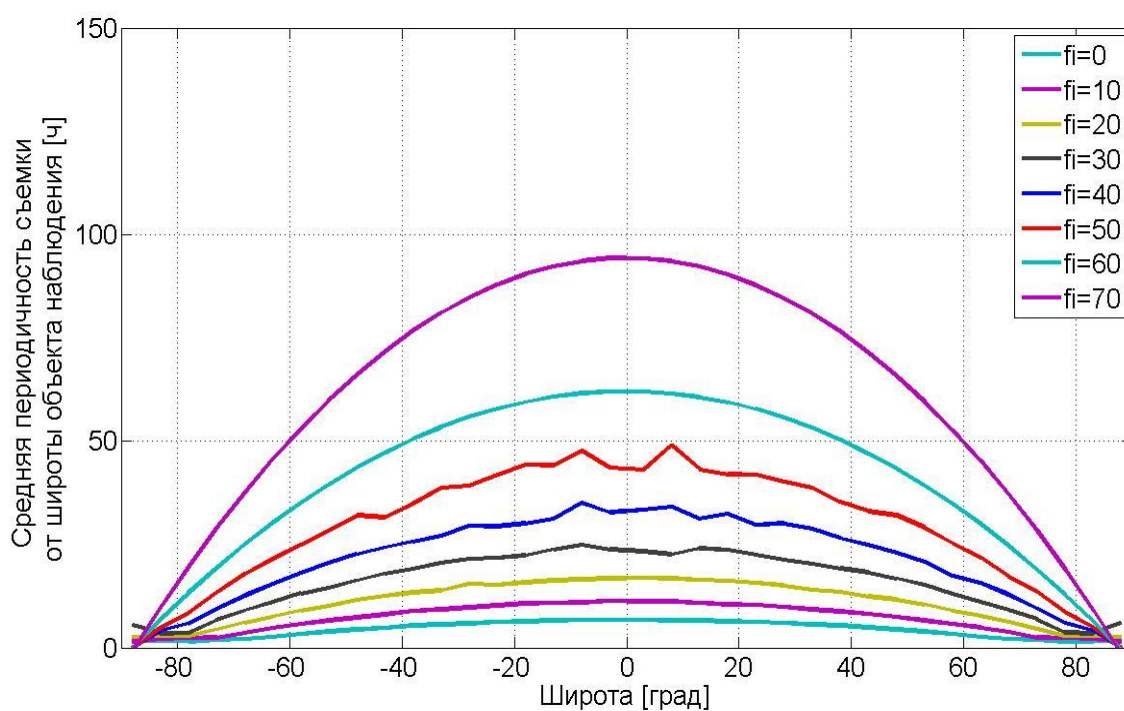


Рис.11 Зависимость средней периодичности съемки от широты и угла обзора аппаратуры  $\bar{f}_i$  – это угол  $\gamma$

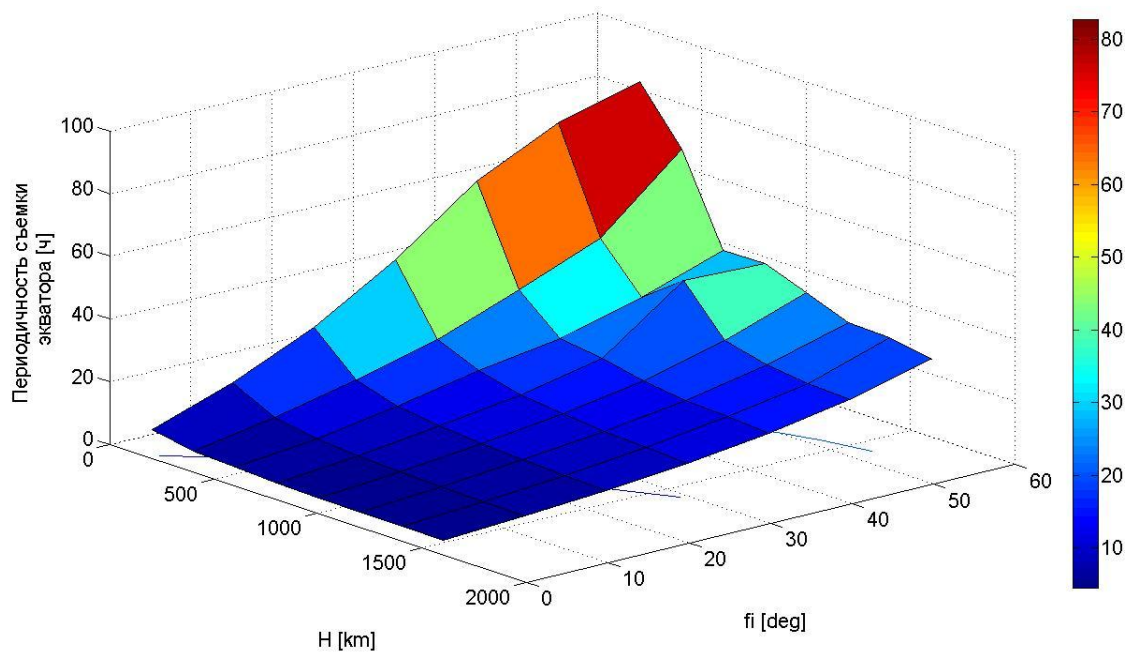


Рис.12 Зависимость средней периодичности съемки экватора, угла обзора аппаратуры и высоты полета спутника.

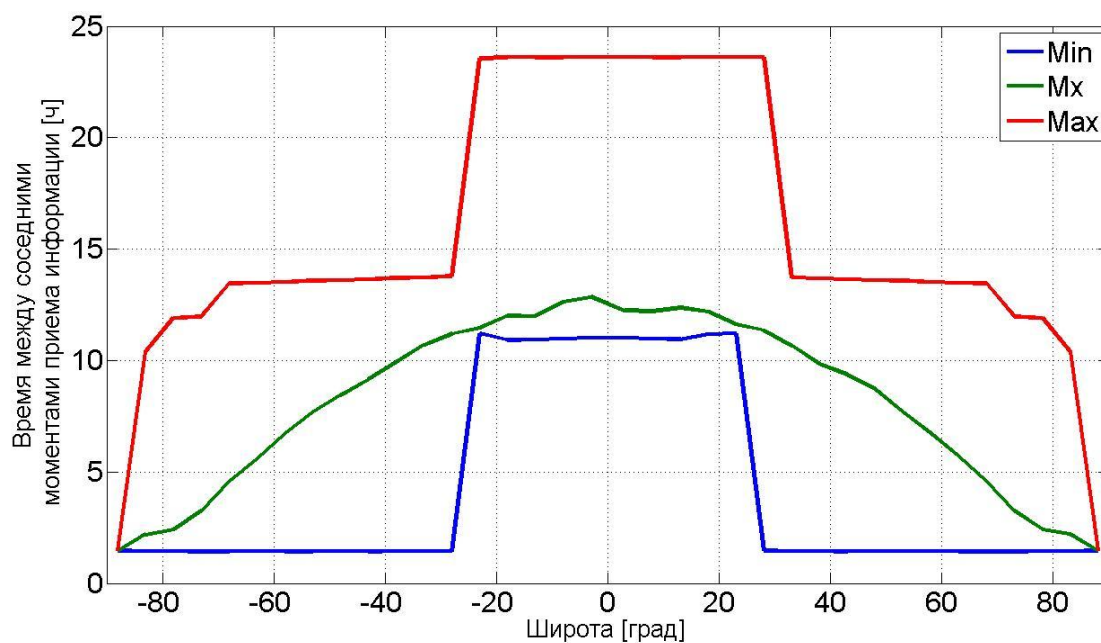


Рис.13 Зависимость минимального, среднего и максимального времени между пролетами спутника над ППИ в зависимости от широты. Высота полета спутника 400 км.

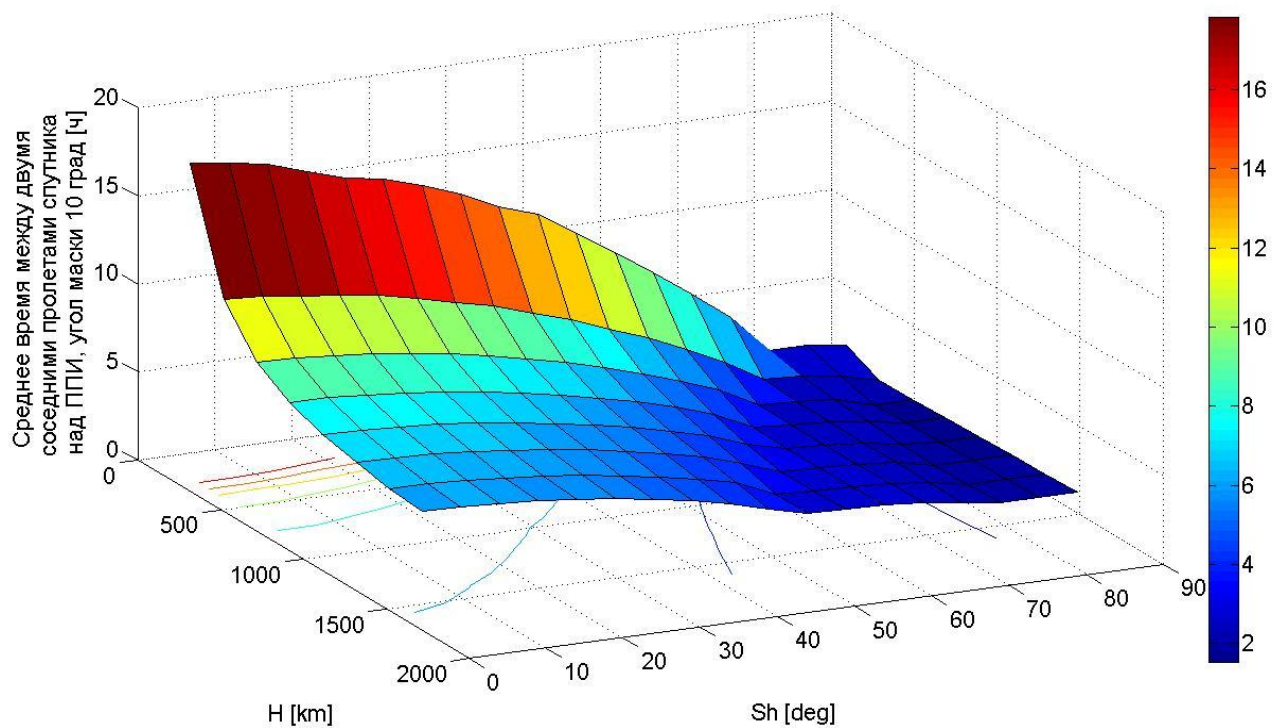


Рис.14. Зависимость среднего времени между пролетами спутника над ППИ в зависимости от широты и.высоты полета спутника

На рисунке 9 представлены зависимости средней периодичности наблюдений поверхности Земли от высоты орбиты спутника, угла обзора целевой аппаратуры, и широты наблюдаемой территории. Как видно из графика зависимость периодичности наблюдений от широты наблюдаемой территории и высоты полета КА представляет собой «горку». Периодичность уменьшается при увеличении высоты полета КА либо увеличении угла обзора. Зависимость периодичности наблюдений от широты снимаемой территории носит закономерный характер – периодичность наблюдения экватора является наибольшей, периодичность наблюдения полюсов Земли наименьшей.

Для качественного анализа будет достаточно использовать зависимость периодичности наблюдений от высоты и зоны обзора целевой аппаратуры для экватора, т.к. для любых других широт значения периодичности будут строго меньше чем на экваторе. Данная зависимость представлена на рисунке 12

На рисунке 14 представлена зависимость среднего времени между моментами пролета спутника над ППИ в зависимости от широты расположения ППИ и высоты орбиты спутника. Как видно из данного графика, чем выше высота орбиты спутника и чем больше широта расположения ППИ, тем меньше интервал времени между пролетами.

Для иллюстрации практической значимости полученных результатов приведем пример решения задачи оптимизации по заданному выше критерию.

Пусть заданы следующие ограничения:

Угол характеризующий зону обзора аппаратуры  $\gamma \geq 40$  [град]

Для выполнения требований по пространственной разрешающей способности высота орбиты не может быть более 1000 [км]

Периодичность наблюдений экватора не более 24 [ч]

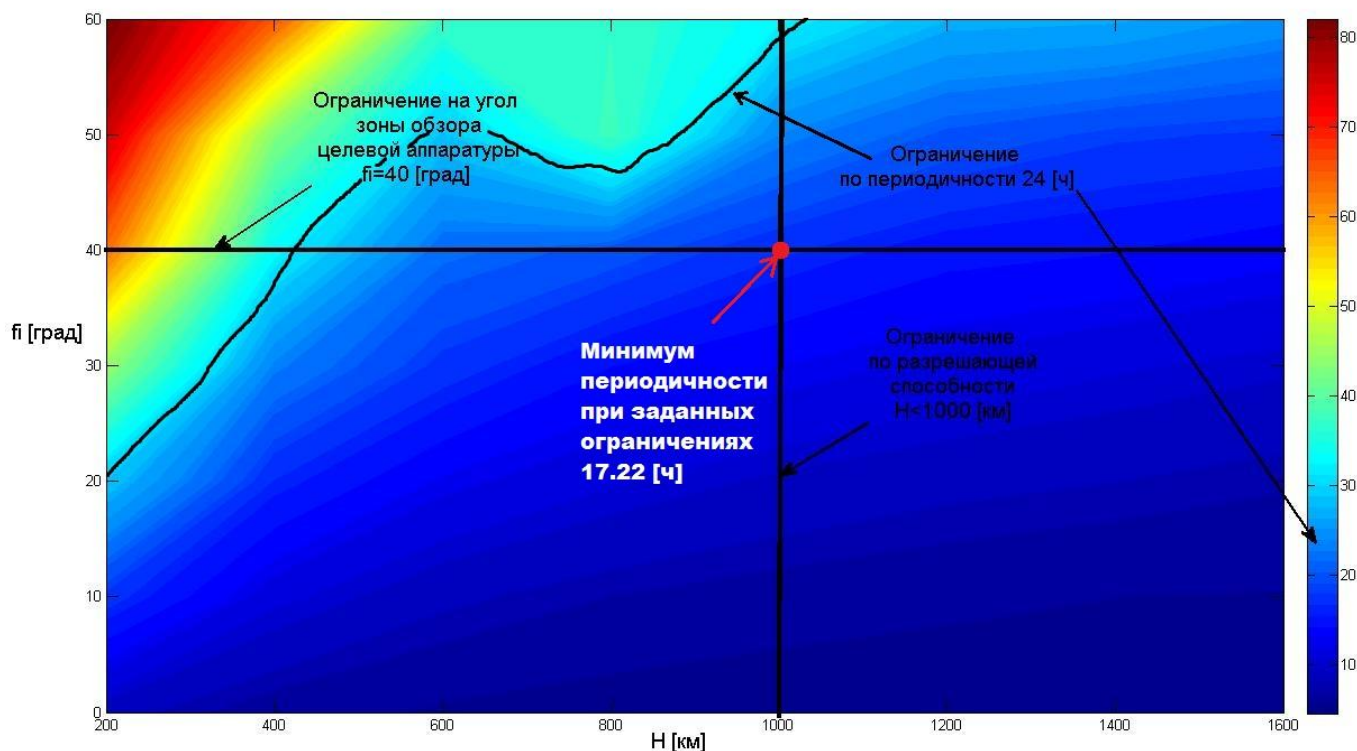


Рис.15 Выбор высоты орбиты спутника при заданных ограничениях на периодичность съемки, пространственную разрешающую способность, и зону обзора аппаратуры

Как видно из графика на рисунке 15, так как функция является практически «спуском», экстремум при заданных выше ограничениях будет лежать на их пересечении. Основным практическим результатом для разработчиков КС ДЗЗ является то, что мы можем найти численное значение периодичности наблюдений, задав только высоту орбиты спутника и зону обзора аппаратуры.

## 6. Сравнение характеристик спутниковых систем состоящих из нескольких аппаратов

Оценивать периодичность наблюдений системы, состоящей из нескольких спутников, можно с использованием численных вычислений по методике, аналогичной представленной ранее, и она существенно зависит от взаимного расположения спутников на орбитах. Для некоторой оценки улучшения периодичности от введения дополнительных спутников в систему, была рассмотрена спутниковая система ДЗЗ гидрометеорологического назначения Метеор-3М.

В настоящее время эксплуатируется один КА типа Метеор-М. В планах на будущее построение системы из трех таких аппаратов, расположенных на 2-х орбитах с высотами  $h=820$  км,  $u=[0\ 180]$  град,  $\Omega=[0\ 90]$  град. Варианты построения системы представлены на рисунках далее:

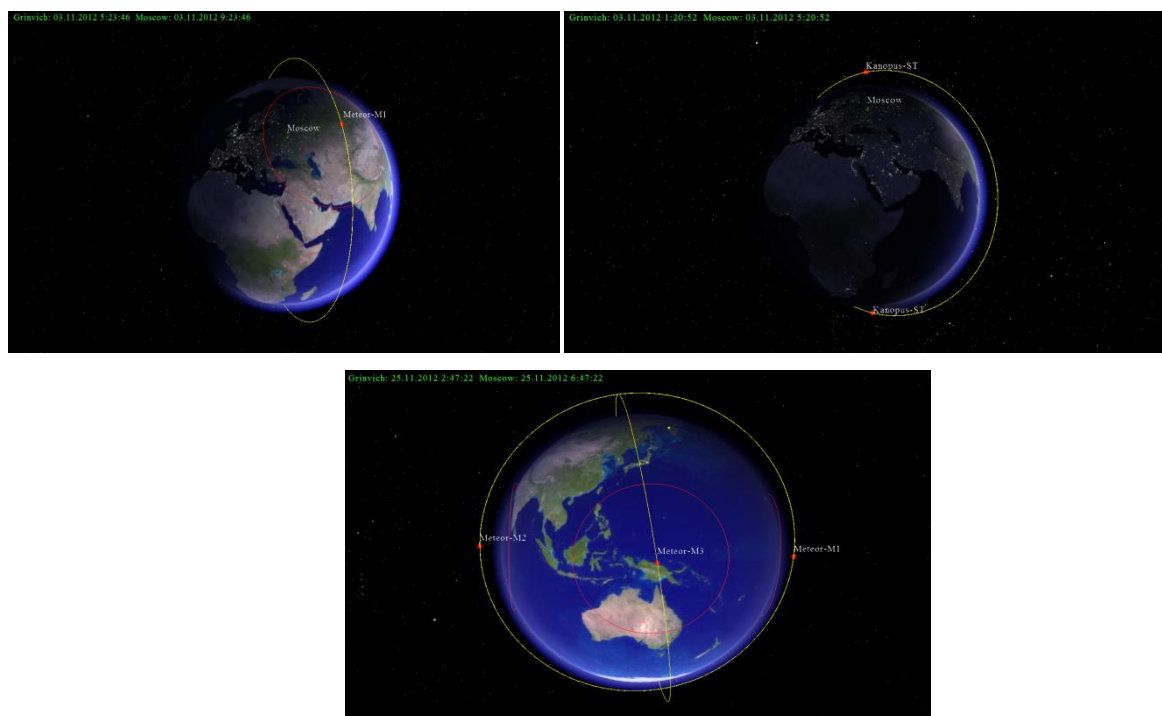


Рис. 16 Взаимное расположение спутников в системе Метеор-М

На спутниках планируется устанавливать одинаковую съемочную аппаратуру модуль температурно-влажностного зондирования атмосферы (МТВЗА) угол обзора  $\sim 110$  и мультиспектральная камера высокого разрешения (МКВР) - угол обзора  $\sim 30$ .

С использованием предложенной ранее методики был произведен расчет периодичности съемки для аппаратуры типа МТВЗА и оперативности приёма информации на ППИ, расположенном в Москве.

Таблица 1. Периодичность и оперативность в зависимости от числа спутников в системе.

Система	Средняя периодичность съемки любой точки экватора [ч]	Оперативность приема информации (ППИ - Москва) [ч]
Метеор-М1	28.451	3.509
Метеор-М2	20.893	2.343
Метеор-М3	14.54	1.76

При увеличении КА в группировке КС ДЗЗ, периодичность наблюдений и оперативность приема информации уменьшаются. Каждый следующий спутник в системе Метеор-М1 уменьшает значения периодичности и оперативности в ~1.2-1.4 раза.

## 7. Оптимизация планирования целевого функционирования КС ДЗЗ

### 7.1 Критерий оптимальности функционирования системы ДЗЗ

В качестве критерия эффективности функционирования системы будем использовать совокупную ценность информации, полученной в результате съемки наземных объектов в соответствии с заявками:

$$J_{i,k} = \left(1 - \frac{|\theta_{i,k}|}{\theta_{\max i}}\right) * \delta^{\text{sun}} p_{i,k}, i = \overline{1, N}, k = \overline{1, k_i}, \quad (26)$$

Где,  $i$  – номер спутника,  $k$  – номер заявки,  $J_{i,k}$  – «доход» от выполнения  $k$ -й заявки  $i$ -м спутником,  $\theta_{i,k}$  – угол между надирной линией и направлением на объект съемки,  $\theta_{\max i}$  – максимально возможный угол между надирной линией и направлением на объект,  $\delta^{\text{sun}}$  – угол возвышения солнца над горизонтом. Суммарный критерий оптимальности плана работы установленной на спутниках аппаратуры:

$$J = \sum_{i=1}^{N_i} J_{i,k} u_{i,k} \rightarrow \max, \text{ где } N_i \rightarrow \min. \quad (27)$$

При этом необходимо найти минимальное количество съёмок объекта, чтобы с учетом облачности надсняемой территорией вероятность снять объект хотя бы один раз была не меньше 99.7%.  $u_{i,k}$  - управляющий параметр равен 0, если

мы не проводим съёмку или 1, если мы проводим съёмку. Т.о. необходимо найти матрицу  $U = \{u_{i,k}\}$ , которая максимизировала бы указанный критерий. При решении задачи учитываются следующие ограничения и допущения: задана конкретная КС ДЗЗ со всеми параметрами, наземные пункты приема информации и их параметры заданы. При решении задачи оптимизации планирования целевого функционирования используются два вида ограничений: статические и динамические. К статическим ограничениям, относятся ограничения на угол солнца над горизонтом, время проведения съёмки. К динамическим ограничениям относятся наполненность БЗУ. Передача информации происходит с заданной в начальных условиях моделирования скоростью сброса, в БЗУ запись происходит мгновенно.

## 7.2 Методика решения задачи оптимизации планирования целевого функционирования

Последовательных возможных моментов съёмки разных объектов со всеми параметрами можно представить в виде матрицы:

$$\begin{aligned}
 Matrix &= \begin{bmatrix} x_{1,1} & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & x_{N,M} \end{bmatrix}_{N,M} \\
 x_{i,j} &= [\varphi_{i,j} \ \gamma_{i,j} \ B_{i,j}] \\
 k_j &= [k_1 \ \dots \ k_N]
 \end{aligned}
 \tag{28}$$

Где, N-число объектов, M- максимальное число пролетов над одним из объектов.

$\varphi_{i,j}$  – угол между направлением на объект и надирной линией,

$\gamma_{i,j}$  – угол возвышения солнца над горизонтом,

$B_{i,j}$  – облачность над объектом наблюдений в момент пролета.

$k_j$  – важность съёмки  $j$  – го объекта.

Данную матрицу можно представить в виде вектора, расположив все пролеты во времени.



$\hat{X} = \{x_1, \dots, x_z\}$  , где  $z$ - общее количество пролетов. Далее будем последовательно назначать съемки, в соответствии с максимальным значением выбранного критерия  $J$ . На каждом шаге при назначении новой съемки, необходимо проверять ограничения – на объем БЗУ, и на угол отклонения камеры, если таковые есть. В случае если назначенная на  $j$ -м шаге съемка не удовлетворяет ограничением, в план включается съемка, следующая по значению критерия. Данная методика последовательных назначений достаточно подробно описана в [7].

### 7.3 Пример решения задачи планирования целевого функционирования спутниковой системы состоящей из 5 КА

Для демонстрации расчета оптимального планирования было проведено планирование работы спутниковой аппаратуры на 14 дней для системы состоящей из 5 КА при следующих начальных данных:

Параметры баллистической группировки пре следующие :

Зона обзора аппаратуры составляет 60 градусов, высота полета КА 820 [км], наклонение соответствует наклонению для ССО и равно 98.72, орбиты разбросаны равномерно по долготе восходящего узла с шагом 70 градусов. Данная орбитальная группировка представлена на рисунке 21.

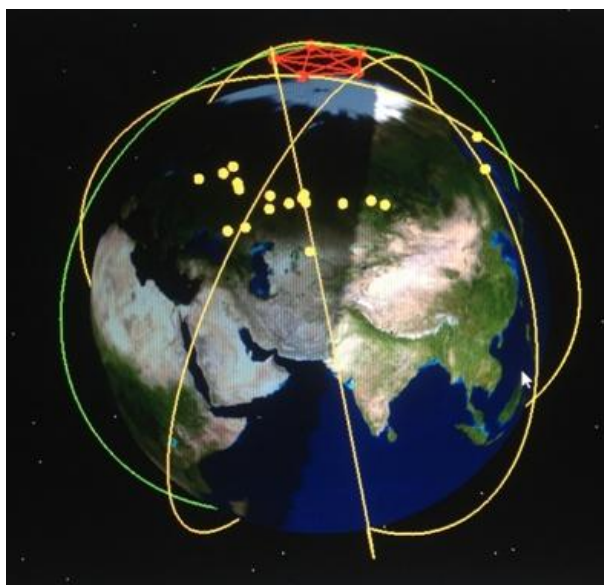


Рис. 17 Орбитальная группировка, для которой производится оперативное планирование целевого функционирования

Объем БЗУ на каждом спутнике равен 48 Гб, объем одного кадра равен 1 Гб, скорость передачи информации на землю 5 Мб/с, ППИ – Москва.

Далее на рисунке 22 показана зависимость возможного времени сброса св[сек] от момента времени на интервале планирования [сут]. На рисунке 23 представлен график, на котором показано, с какого спутника осуществляется сброс информации на землю, в моменты времени обозначенные на рисунке 22.

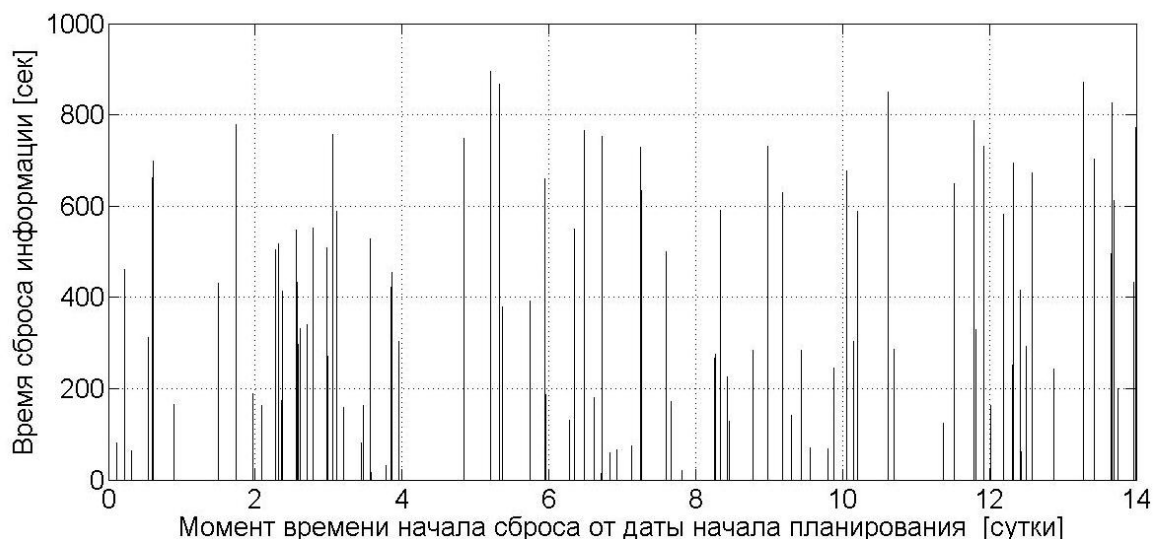


Рис.18 Зависимость интервала времени пролета спутника над ППИ от момента времени входа в зону радиовидимости.

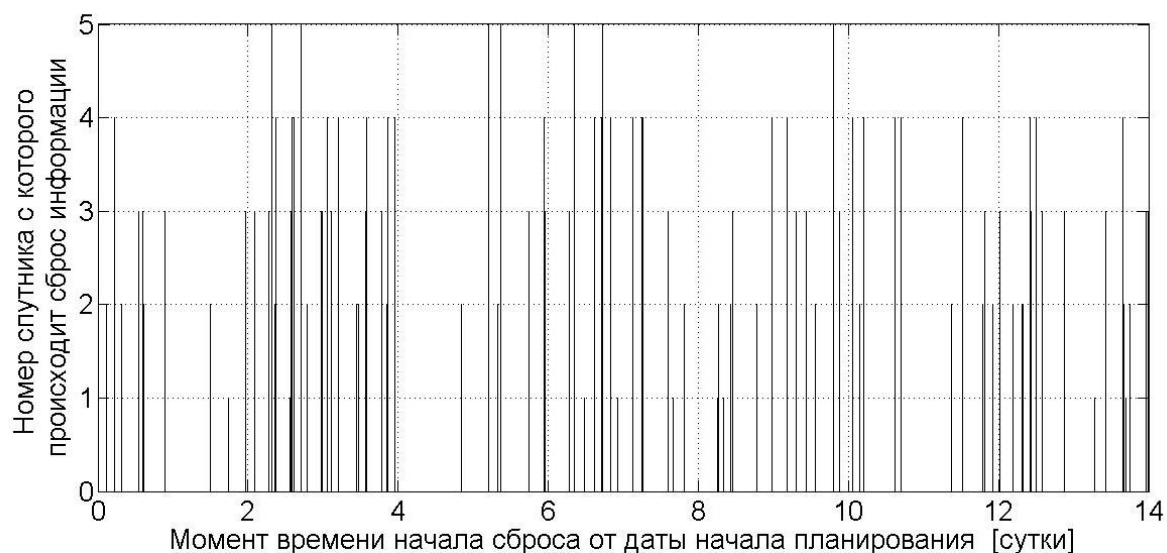


Рис.23 Зависимость номера спутника над ППИ от момента времени входа в зону радиовидимости.

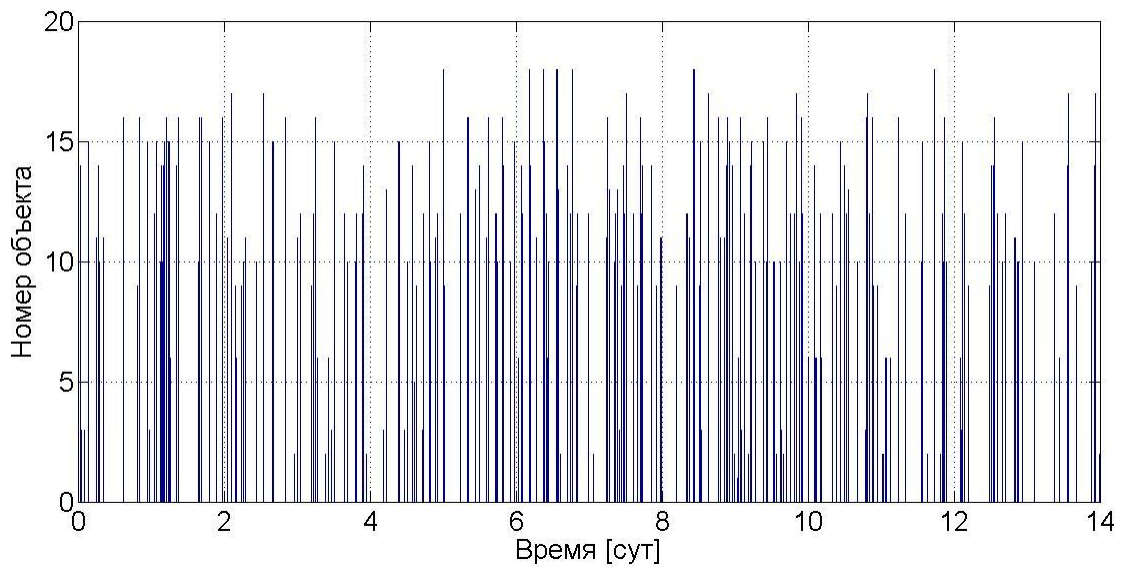


Рис.19 Циклограмма пролета системы над объектами съемки на интервале планирования.

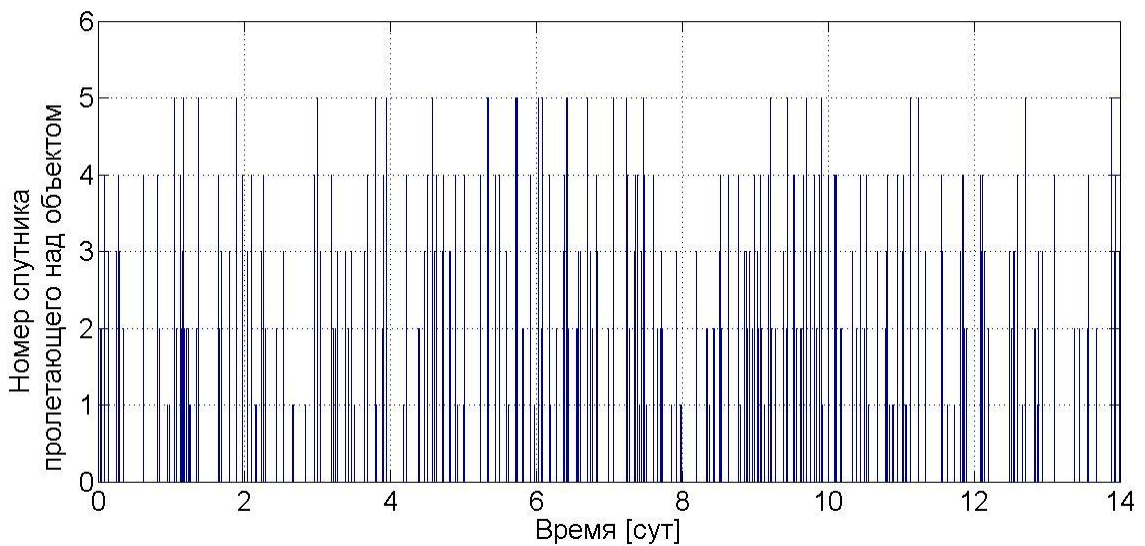


Рис.20 Номер спутника системы пролетающего над объектом съемки на интервале планирования.

На рисунке 24 представлен оптимальный план проведения съемок объектов, по оси Y откладывается номер объекта, съемка которого производится, по оси X момент времени на интервале планирования, когда производится съемка. На рисунке 24, представлен аналогичный график, на котором по оси Y откладывается номер спутника, который будет производить съемку.

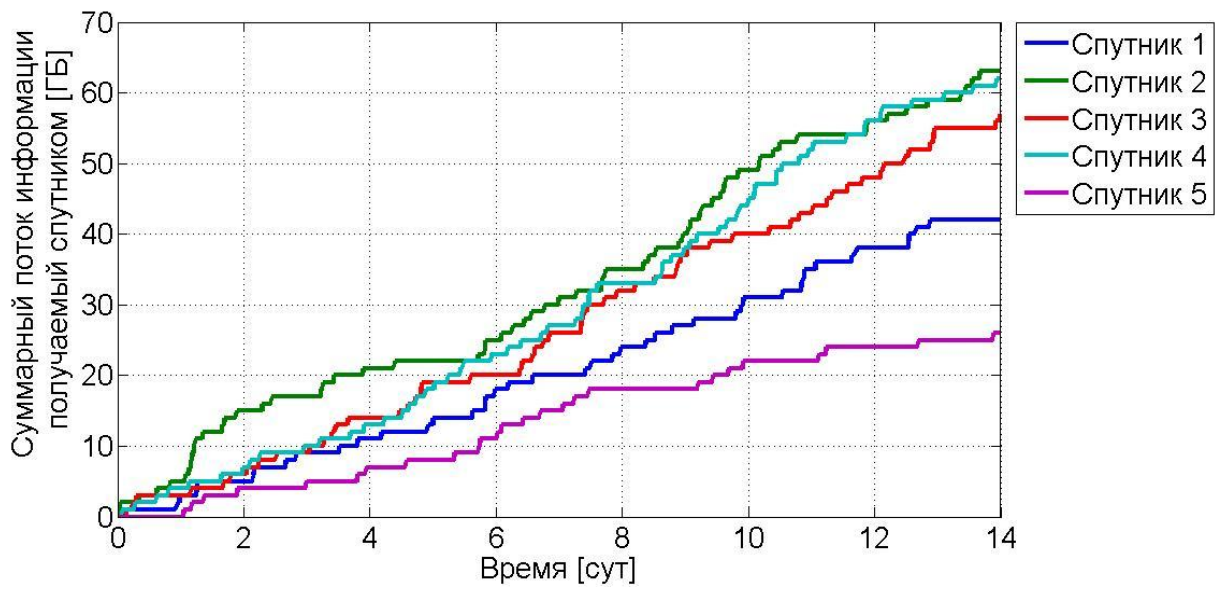


Рис.21 Суммарный поток информации получаемый каждым спутником

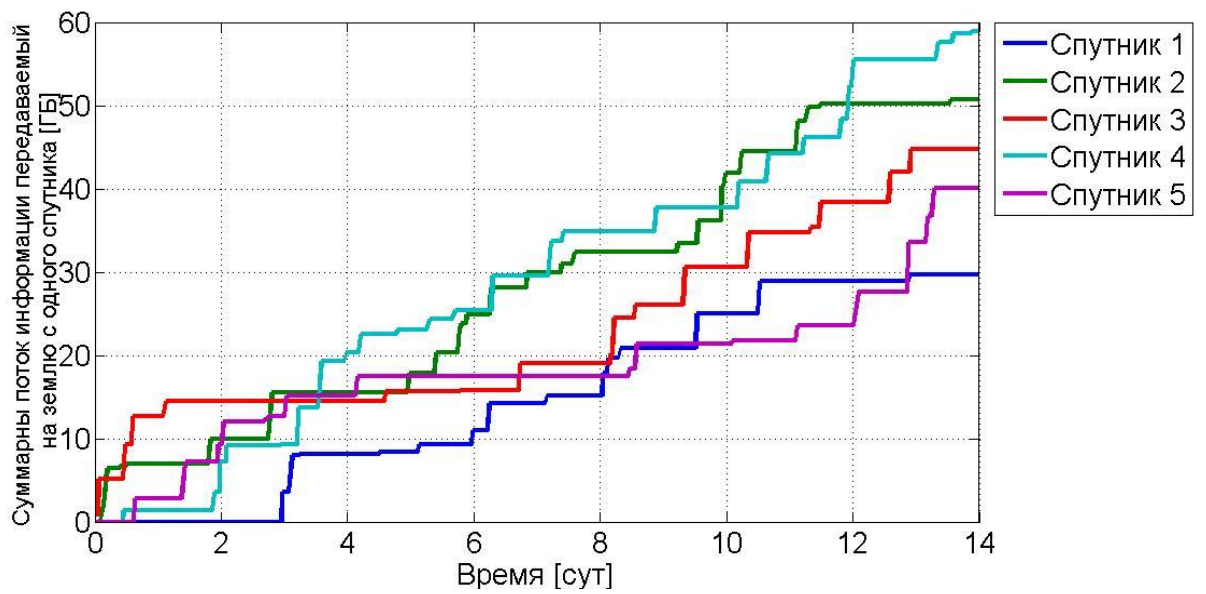


Рис.22 Суммарный поток информации передаваемый на землю каждым спутником

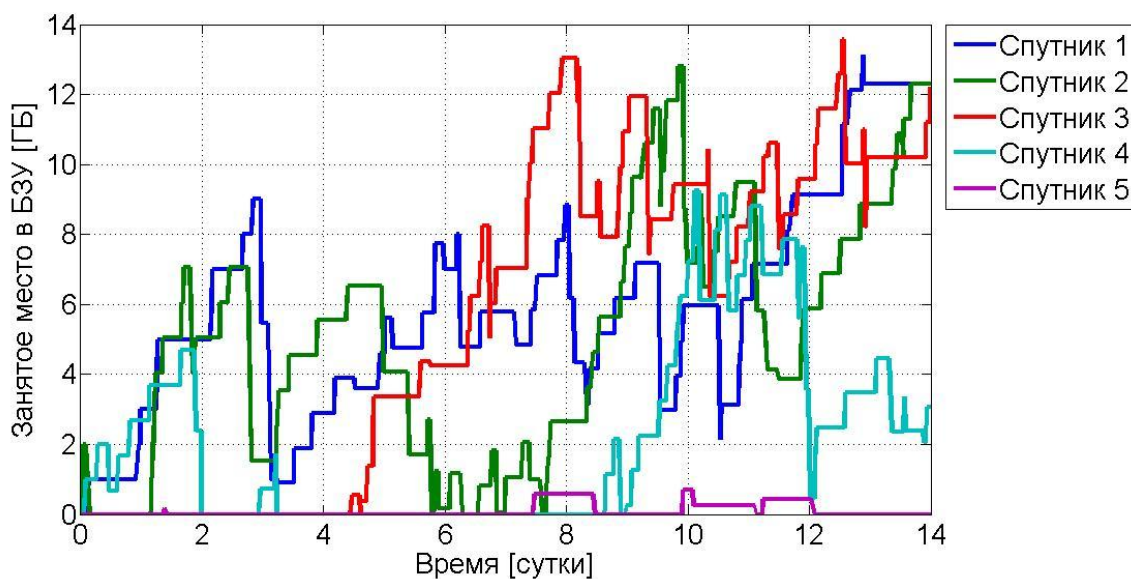


Рис.23 Динамика изменения состояния БЗУ

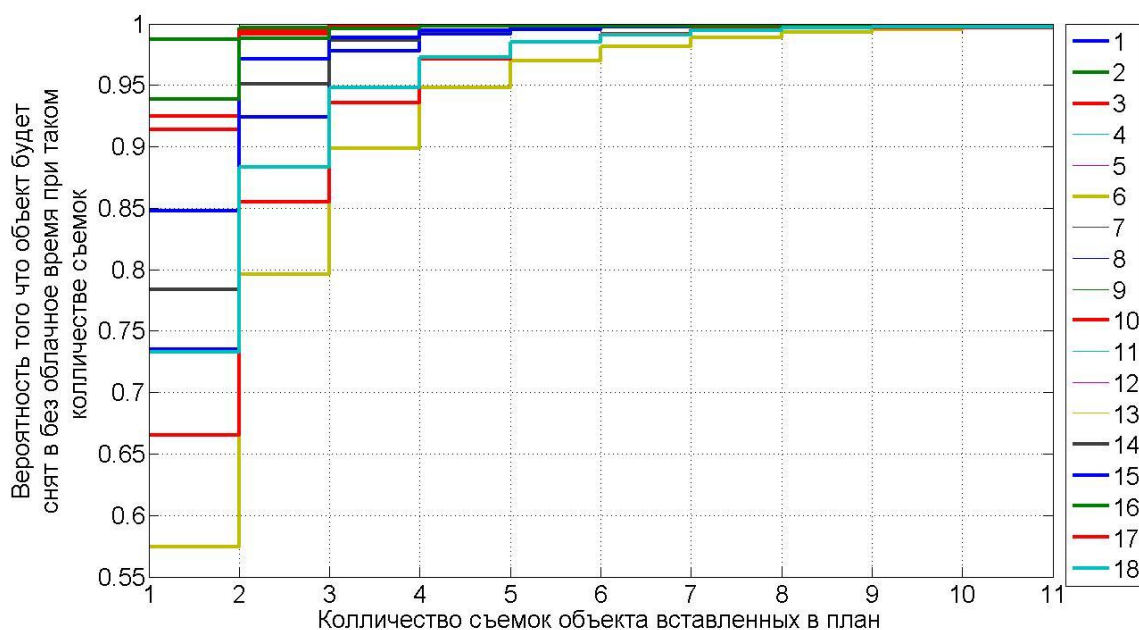


Рис.24 Вероятность снять объект в безоблачное время в зависимости от количества съемок вставленных в план

На рисунке 26 представлена зависимость суммарного объема информации, который поступает в БЗУ спутника при проведении съемки в соответствии с составленным планом работы аппаратуры. На рисунке 27 представлен суммарный объем информации, который сбрасывается с каждого спутника на землю. На рисунке 28 представлена зависимость состояния БЗУ каждого спутника по времени. На рисунке 29 представлена зависимость вероятности снять объект в безоблачное время от количества съемок вставленных в план.

Как видно из результатов представленных выше на графиках для того, чтобы снять каждый объект, не закрытый облаками, с вероятностью не менее 0.997 необходимо провести в лучшем случае не менее двух съемок, в худшем не менее 12. При заданных условиях моделирования, параметры скорости сброса информации на землю и БЗУ позволяют произвести съемку по выбранному критерию.

## **8. Выводы**

1. Проведен анализ целевых задач спутниковых систем ДЗЗ, а также состава целевых и проектных параметров их подсистем.
2. Предложен набор методик необходимый для моделирования функционирования системы ДЗЗ состоящей из нескольких КА, включая методику расчета периодичности съемки системы.
3. Предложен метод оптимизации спутниковой системы ДЗЗ по критерию минимума периодичности наблюдений при заданных диапазонах ограничений на другие параметры.
4. Разработано программное обеспечение для решения задач анализа и оптимизации спутниковых систем ДЗЗ.
5. Проведен анализ и предложен подход для выбора оптимальных проектных параметров (высоты и угла зоны обзора аппаратуры) при заданных ограничениях и фиксированных других проектных параметров по результатам анализа систем состоящих из одного и нескольких спутников.
6. С использованием разработанных методик и программного обеспечения проведен анализ целевых параметров системы Метеор-МЗ, состоящей из 1,2 и 3 спутников.
7. Предложен критерий оптимизации оперативного планирования целевого функционирования, произведены тестовые расчеты с его использованием.
8. Программный комплекс используется в работах ЦНИИмаш, НТЦ «Космонит» ОАО «Российские космические системы», МАИ.

## **Список использованных источников**

1. *Лебедев А.А.* Системный анализ. Компьютерный учебник. Кафедра 604, диск, 2004.

2. Константинов М.С., Каменков Е.Ф., Перелыгин Б.П., Безвербый В.К. Механика космического полёта. "Машиностроение" Москва 1989.
3. Чернов А.А., Чернявский Г.М. Орбиты спутников дистанционного зондирования Земли.
4. Гарбук С.В., Гершензон В.Е. Космические системы дистанционного зондирования Земли. Москва 1997 г.
5. Назаренко А.И., Скребушевский Б.С. Эволюция и устойчивость спутниковых систем. 1981г. Издательство «Машиностроение».
6. Дарных В.В., Усовик И.В. Автоматизация параметрического анализа целевого функционирования космических систем дистанционного зондирования Земли Интернет–журнал «Труды МАИ», 2011. Выпуск № 47. 15 с. <http://www.mai.ru>
7. Дарных В.В., Малышев В.В. Планирование управления съёмочной аппаратурой системы космических аппаратов // Изв. РАН. ТиСУ. 1998. № 6. С.135-149.
8. Малышев В.В., Бобронников В.Т., Дарных В.В. и др. Планирование целевого функционирования спутниковых систем мониторинга: Учебное пособие. М.: МАИ, 2002. 80 с.
9. Darnorykh V., Malyshev V. Planning the Control of Survey Devices for a System of Satellites / Journal of Computer and Systems Sciences International (A Journal of Optimization and Control). - МАИК НАУКА / Interperiodica Publishing. 1998, V.37, № 6. P.957-969.
10. Дарных В.В. Планирование целевого функционирования космических аппаратов и систем: задачи, методы и алгоритмы их решения // Интернет–журнал «Труды МАИ», 2004. Выпуск № 16. 15 с. <http://www.mai.ru>