

УДК 004.94

## ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЕ ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБЛИКА ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ЦЕЛЕВОЙ АППАРАТУРЫ ДЛЯ КА В СОСТАВЕ КОСМИЧЕСКОГО СЕГМЕНТА СККП

*Поздняков А.Ю., студент  
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,  
кафедра «Космические летательные аппараты и разгонные блоки»*

*Научный руководитель: Старчак С.Л.,  
д.т.н., доцент, профессор отдела № 1 УВЦ ВИ  
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана*

*Кузнецов В.А., начальник ВК № 2 ФВО ВИ  
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана*

*Научный консультант: Убоженко Д.Ю., к.т.н., доцент,  
начальник управления НИЦ РКО 4 ЦНИИ МО РФ  
[bauman@bmstu.ru](mailto:bauman@bmstu.ru)*

Задача получения информации о космических объектах чрезвычайно сложна. Малый размер космических объектов, высокая скорость движения для низкоорбитальных аппаратов и большая удалённость для аппаратов на геостационарной орбите сильно затрудняют их обнаружение и получение каких-либо данных. Общая задача получения информации о космических объектах разделяется на задачи: получения координатной информации и некоординатной информации.

Использование приборов орбитального базирования позволяет преодолеть один из самых главных факторов, препятствующих успешному получению некоординатной и координатной информации об орбитальных объектах – влияние атмосферы. Конвективные потоки, аэрозольные загрязнения и общая засветка в дневное время сильно затрудняют как поиск космических аппаратов, так и получение некоординатной информации о них. Под действием данных факторов снимки теряют резкость, искажаются, нарушается цветовая гамма. Другие же факторы, такие как погодные явления, облачность, и в большинстве случаев рассеянное свечение атмосферы в дневное время могут полностью блокировать работу наземных средств. Ограниченная область обзора так же является одним из существенных недостатков наземных средств получения информации о космических объектах.

Вывод аппаратуры наблюдения в космос позволяет устранить влияние этих факторов. Но это порождает другие ограничивающие факторы. Самым главным из них является ограничение по массе размещаемой аппаратуры, связанное с дороговизной вывода на требуемую орбиту и ограниченностью транспортных возможностей ракетоносителей. Это влечёт за собой так же ограничения по энергоснабжению и бортовым вычислительным средствам. Таким образом, для получения удовлетворительных результатов считается рациональным разделение задач получения координатной и некоординатной информации между разными типами аппаратов. [9]

### **Постановка задачи и определение требований к оптической системе КА ККП на ВЭО**

В [8] был обоснован вариант решения задачи получения координатной и некоординатной информации о космических объектах в области ГСО путём размещения трёх аппаратов на высокоэллиптической орбите. Обладая период обращения около 12 часов, при выбранном варианте орбитального построения аппарат два раза в сутки приближается к области геостационарных орбит, и дважды проходит в непосредственной близости от Земли [4]. Особенностью данного варианта орбитального построения является то, что оптимальные условия для получения требуемой некоординатной информации реализуются только в краткий промежуток времени при прохождении апогея орбиты (порядка 10-20 минут). Это может являться недостатком, поскольку влечет необходимость предъявления жёстких требований на систему управления положением и ориентацией аппарата, а так же к качеству полученной ранее координатной информации как фактору успешного наведения. Период получения координатной информации зависит от оптической системы и, при отдельных каналах получения координатной и некоординатной информации, составляет порядка двух часов. Преимуществом принятого в [8] варианта орбитального построения КСг является оперативность реагирования на изменения состава орбитальных группировок в области геостационарных орбит (от 6 до 12 часов). Другим положительным качеством варианта КСг является достаточно длительный срок функционирования КА в дежурном режиме при относительно небольших затратах топлива, а так же более дешёвый и оперативный способ вывода аппарата на рабочую орбиту, что особенно важно в условиях военной опасности, подготовки и начала боевых действий.



Рис. 1. Общая схема функционирования КА ККП на ВЭО

Необходимо определить рациональный технический облик оптической системы с целью уточнения технического облика КА и орбитального построения сегмента. Для этого используем параметры, полученные на предыдущем этапе проектирования КА КСГ.

В [8] были получены потенциальные условия наблюдения, исходя из которых можно провести предварительное проектирование оптической системы. Так же были заданы требования по решению целевых задач. В качестве типового объекта наблюдения принят космический аппарат на ГСО с характерным размером отражающей поверхности  $\sim 0.5$  м. Вероятность обнаружения  $P \geq 95\%$ . Для проектирования были заданы следующие параметры:

дистанция обнаружения на этапе получения координатной информации  
Нобн. = 5000 км;

дистанция наблюдения на этапе получения некоординатной информации  
Ннабл. = 200 км;

ширина полосы захвата на этапе обнаружения  $L \geq 2000$  км;

эффективная звёздная величина цели на этапе обнаружения  $m = 10$ ;

разрешающая способность при получении некоординатной информации  $R = 10$  см;

размер пиксела ПЗС матрицы  $\delta = 10$  мкм;

размер приёмной части ПЗС матрицы  $l = 10$  см.

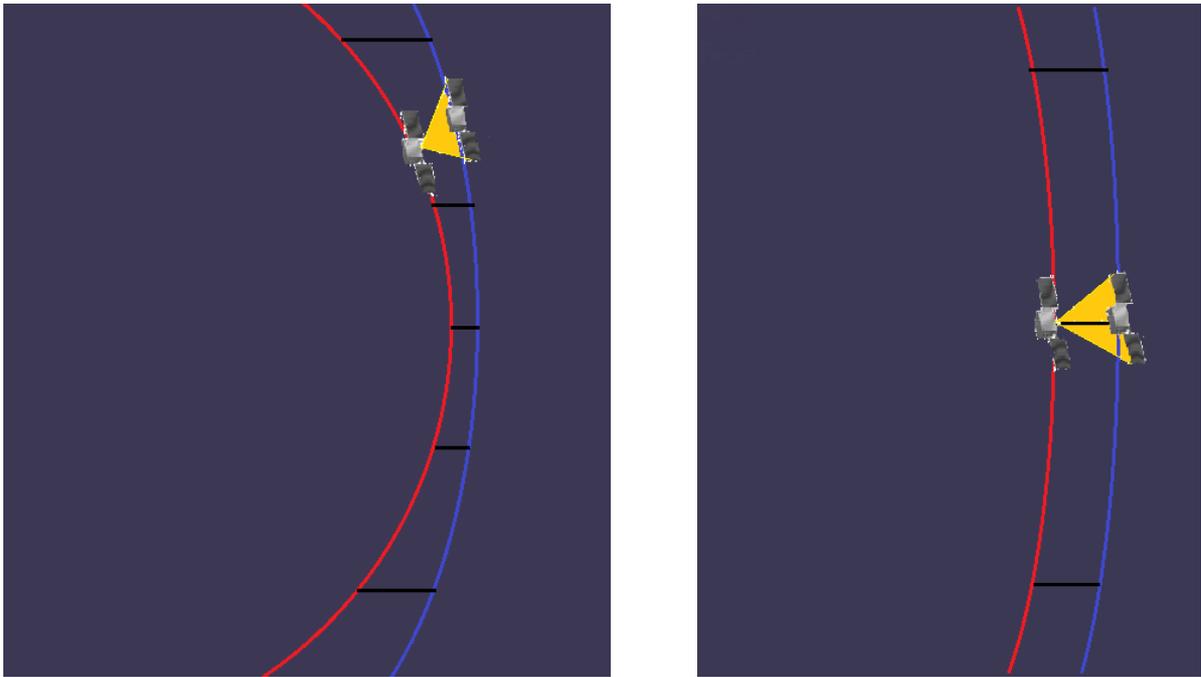


Рис. 2, 3. Участок получения координатной информации и участок получения некоординатной информации

За основу оптической системы были приняты стандартные схемы рефракторов и рефлекторов, используемых в космической технике. Для телескопов системы обнаружения и получения координатной информации были взяты за основу датчики звёздного неба, а для канала получения некоординатной информации – телескоп системы SSBS [7].

### **Проектирование варианта оптической системы для космического сегмента СККП для случая размещения КА на ВЭО**

Общий алгоритм оптического проектирования включает в себя выполнение следующих действий:

- задание параметров наблюдаемого объекта, требуемых параметров системы;
- определение условий освещённости, периода наблюдения;
- определение требуемой разрешающей способности;
- определение требуемой чувствительности;
- расчет и определение облика оптической системы получения координатной информации;
- расчет и определение облика оптической системы получения некоординатной информации;
- определение предпочтительной конструктивной схемы оптической системы;

- расчет массово-габаритных характеристик оптической системы, выбор оптимального варианта компоновки.

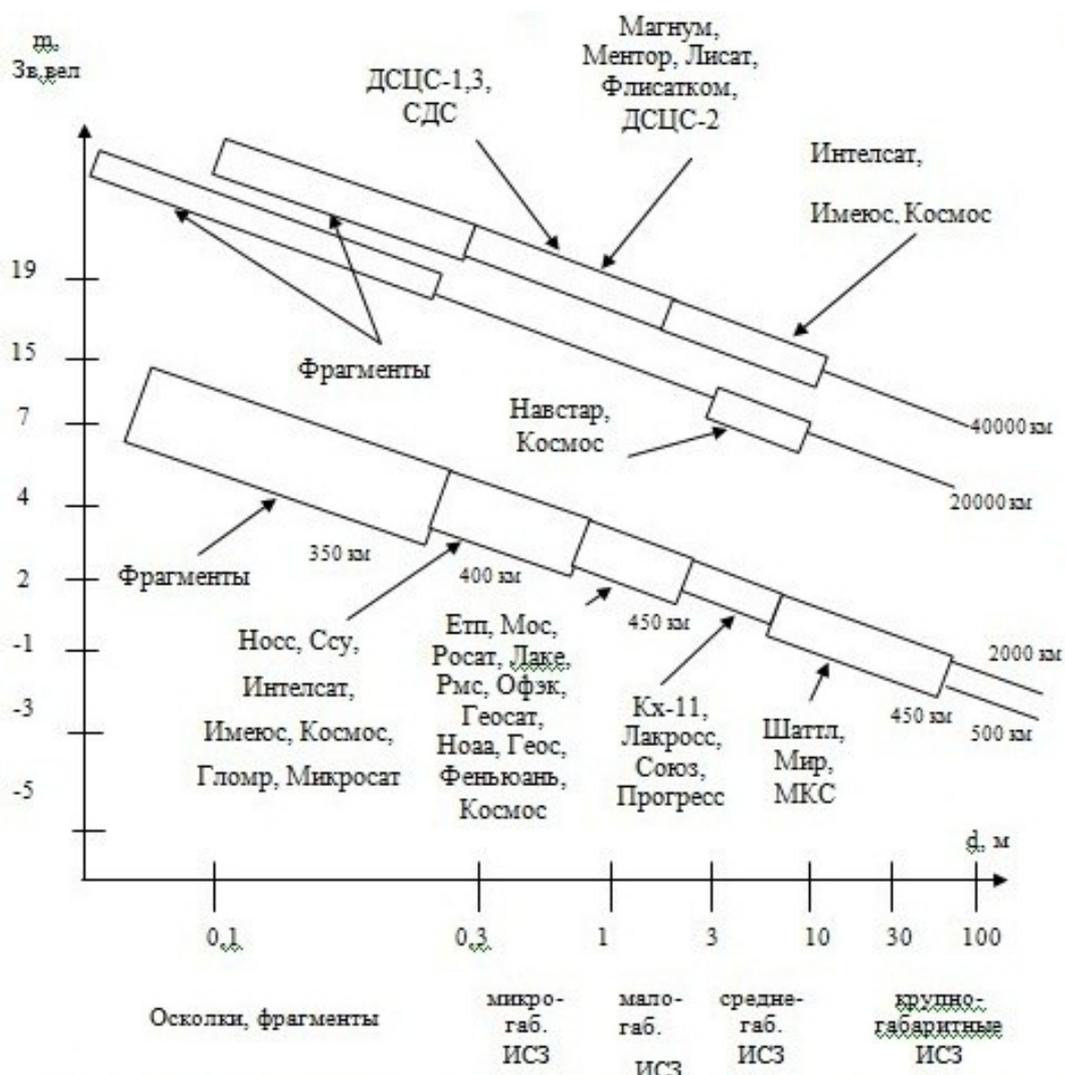


Рис. 4. Зависимость видимого блеска ИСЗ от расстояния и размеров

Исходными параметрами являются:

- видимый блеск цели в абсолютной звёздной величине ( $m$ );
- дистанция обнаружения и наблюдения ( $N_{обн}$ ,  $N_{набл}$ );
- разрешающая способность для системы сбора некоординатной информации ( $R$ );
- ширина поля просмотра для системы обнаружения и получения координатной информации ( $L$ );
- размер пикселя  $\delta$  и линейный размер  $l$  ПЗС матрицы;

Согласно законам геометрической оптики, разрешающая способность оптической системы определяется разрешающей способностью приёмника, расстоянием до объекта наблюдения и фокальным расстоянием. Их взаимосвязь определяются формулой:

$$f\delta = 0.001 * \frac{\delta}{R} * \text{Ннабл. } f\delta = 2\text{м.}$$

Где  $\delta$  – размер светочувствительного элемента ПЗС-матрицы (пикселя) в мкм. Это позволяет определить длину оптического канала для системы сбора некоординатной информации [2].

Для системы обнаружения и сбора координатной информации ограничивающим параметром является угловое поле объектива  $2\beta$  град. Так как искажения изображения на этапе получения координатной информации недопустимы, величина  $\beta$  ограничена, и не может превышать 3 град, в связи с возникновением эффекта «рыбьего глаза». Таким образом, фокальное расстояние оптического канала системы обнаружения и получения координатной информации определяется как:

$$f_{\text{Д}} = \frac{l}{\text{tg}(2\beta)} = 0.053\text{м.}$$

В этом случае размер зоны обнаружения будет определяться формулой:

$$L = \text{Нобн.} * \text{tg}(2\beta) = 500\text{км.}$$

Для обеспечения заданной ширины области поля зрения системы обнаружения и получения координатной информации необходимо использовать систему, состоящую из четырёх телескопов с пересекающимися полями зрения. Это позволит обеспечить требуемую ширину полосы обзора за один пролёт, а так же повысит вероятность обнаружения ввиду частичного перекрытия полей зрения телескопов.

Так как рассматриваемый аппарат обладает значительной массой, схема с установкой оптической системы в корпусе КА будет нерациональной, потому что потребует значительных затрат топлива и энергии для обеспечения функционирования КА. Наиболее рациональным будет размещение оптической системы в двухосном карданном подвесе. Использование шаговых позиционных безмоментных электроприводов позволит обеспечить требуемую точность наведения телескопов при минимальном расходе топлива и энергии КА. Но это серьёзно ограничивает допустимую массу и габариты оптической системы.

В процессе движения аппарата по высокоэллиптической орбите наблюдается значительное снижение орбитальной скорости при прохождении апогея, что ведёт к большой разнице относительных скоростей аппаратов на ГСО и ВЭО (до 2.4 км/с). Это обстоятельство ведёт к повышению требований на точность наведения аппарата, ориентацию оптических приборов и работу системы наведения.

Такие особенности движения являются благоприятным фактором для работы оптической системы на этапе обнаружения и получения координатной информации. За счёт смещения спутников-целей относительно видимых звёзд обнаружение и определение орбитальных параметров не составляет трудностей.

На этапе получения некоординатной информации высокая скорость относительного движения при большом периоде накопления сигнала ведёт к падению резкости снимков, смазыванию изображения и потенциальному срыву задачи. Решение этой проблемы возможно либо повышением скорости поворота оптической системы путём использованием высокоскоростных приводов камер, либо путём использования высокочастотных ПЗС матриц с малым периодом накопления.

При наблюдении КА на фоне звёздного неба необходимо учитывать его особенности. Звёздное небо не является абсолютно чёрным телом и, в общем случае (не участок Млечного пути), считается серым телом со светимостью, эквивалентной 23 звёздной величине.

Для нейтрализации этого негативного эффекта требуется повысить светочувствительность оптической системы. В общем случае, для гарантированного обнаружения объекта на фоне звёздного неба необходимо повысить уровень минимальной видимой звёздной величины на 2. Таким образом, требуемая оптическая система должна различать объекты соответствующие  $m = 12$  звёздной величине.

Зависимость диаметра объектива системы обнаружения и получения координатной информации выражается через светимость. Для простоты её можно представить в виде функционала:

$$D_{обн} = f(S, t, m)$$

Где,  $S$  – чувствительность ПЗС-матрицы,  $t$  – время накопления в кристалле ПЗС-матрицы,  $m$  – абсолютная звёздная величина искомого объекта.

В результате расчёта было получено значение  $D_{обн} = 8.05$  см. Принимая во внимание технологические ограничения, принятые упрощения и существующие номиналы оптическим систем, примем  $D_{обн} = 10$  см.

Для оптического канала системы получения некоординатной информации размер объектива определяется как:

$$D_{набл} = \frac{f_{б} * \lambda_{р}}{0.8086 * \beta}, \quad D_{набл} = 0.186 \text{ м.}$$

где  $\lambda_{р}$  – средняя частота рабочего спектра оптической системы (видимый свет),  $\beta$  – линейный размер пиксела ПЗС-матрицы.

Учитывая технологические ограничения, принятые упрощения и существующие номиналы оптических систем, примем  $D_{\text{набл}} = 20$  см.

На финальном этапе расчёта проводится анализ массово-габаритных характеристик аппаратуры оптических систем КА. Для этого были рассмотрены отечественные и зарубежные аналоги подобных систем схожего назначения.

Схема рефрактора обладает максимальной светосилой. За счёт отсутствия падения интенсивности светового потока на отражательных элементах в виду их несовершенства (до 10%) обеспечивается более высокая проникающая способность. Недостатком же таких систем являются большие габаритные размеры и масса относительно рефлекторных систем при той же длине оптического канала.

Рефлекторные схемы за счёт разной компоновки зеркал обладают достаточно широким разнообразием функциональных параметров, габаритных размеров и массы. Самыми простыми являются двухзеркальные системы Ричи-Кретьена (Рис.5 вариант а). По причине недостаточной точности, неудовлетворительного качества изображения и малого угла зрения, данная схема требует установки линзового полевого корректора (Рис.5 вариант б). Трёхзеркальные схемы (Рис.5 варианты в, д, е) чаще всего применяют в системах со сканирующей головкой. Но, ввиду сложности построения и значительных размеров, сложности изготовления и малого мгновенного поля зрения, такие схемы не нашли широкого применения в космической технике. Четырёхзеркальные схемы на данный момент являются самыми перспективными. Они позволяют обеспечить как работоспособность системы в максимально широком спектральном диапазоне (Рис.5 вариант г), так и минимальные габариты и массу при той же длине оптического канала, даже не смотря на необходимость увеличения диаметра входного канала (Рис.5 вариант ж).

Для системы обнаружения и получения координатной информации, исходя из относительно небольшого фокального расстояния и диаметра входного канала, допустимо использовать схему рефрактора – прямого оптического канала. Это обеспечит максимальную светосилу и проникающую способность. Однако в целях повышения массовой эффективности системы и уменьшения габаритных размеров допустимо использовать схему рефлектора двойного отражения (Рис.5 вариант а).

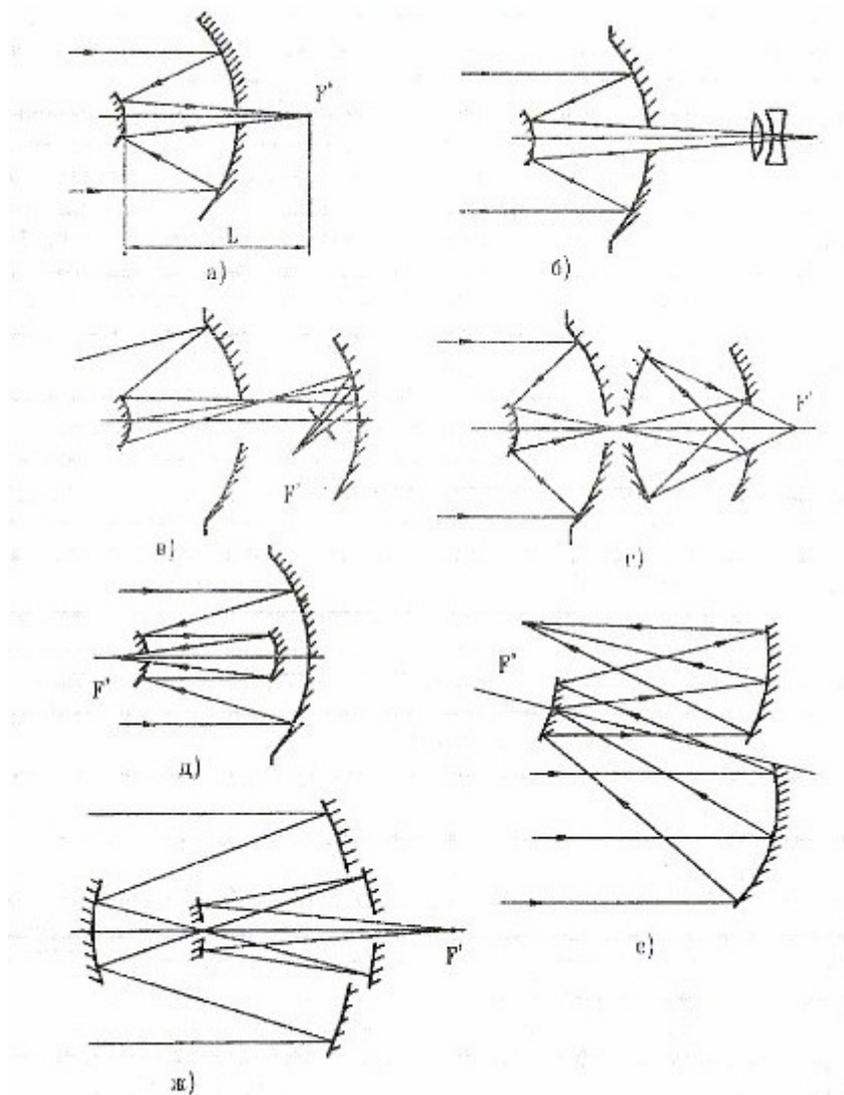


Рис.5. Варианты зеркальных и зеркально-линзовых оптических систем

Для системы получения некоординатной информации, характеризующейся большим фокальным расстоянием оптического канала, применение схемы рефлектора необходимо и является единственным вариантом, позволяющим разместить оптическую систему на двухосном карданном подвесе. Четырёхзеркальная схема – наиболее рациональное решение (Рис.5 вариант ж). Но, повышенные требования точности, предъявляемые к вторичному зеркалу, системы такой конструкции влекут за собой достаточно высокую сложность изготовления и стоимость телескопа, из-за чего такие схемы до сих пор достаточно редки.

Изучив аналоги и продукцию промышленности, можно заметить, что в итоге суммарный вес системы, состоящей из четырёх каналов обнаружения и получения координатной информации, одного канала получения некоординатной информации,

служебных и вспомогательных элементов (лазерные дальномеры и т.д.) и системы двухосевого безмоментного карданного подвеса не будет превышать 400 кг.

В результате повторного массового анализа КА в виду новых данных при условии сохранения траектории, баллистических параметров и запаса характеристической скорости для манёвров, было получено новое значение массы КА КСг  $M = 4000$  кг. Что меньше значения, полученного ранее на 700 кг.

### **Заключение**

В результате предварительного проектирования и анализа оптической системы, был определён предварительный технический облик для системы получения некоординатной информации, а так же системы обнаружения и получения координатной информации. В ходе рассмотрения различных существующих оптических систем был определён рациональный технический облик оптических систем, наиболее полно отвечающих требуемым задачам и условиям эксплуатации.

Полученная система позволяет осуществлять сбор информации как отдельными, так и совмещёнными каналами, используя телескоп получения некоординатной информации для обнаружения и получения координатной информации во время приближения к основному рабочему участку орбиты, или удалении от него.

На основании полученных данных был проведён уточняющий расчёт массовых характеристик КА КСг. Уточнение облика оптической системы позволили снизить ожидаемую проектную массу КА, что ведёт к снижению стоимости как самого аппарата, так и его вывода на орбиту.

### **Список литературы**

1. Эльясберг П.Е. Введение в теорию полета искусственных спутников Земли. — М.: Наука, 1965.
2. Маламед Е.Р. Конструирование оптических приборов космического базирования / Учебное пособие. – СПб.: СПбГИТМО(ТУ), 2002. – 291 с.
3. Скребушевский Б.С. Формирование орбит космических аппаратов. – М.: Машиностроение, 1990. – 256 с.
4. Нариманов Г.С., Тихонравов М.К. Основы теории полёта космических аппаратов. – М.: Машиностроение, 1972. – 608 с.
5. Туманов А.В. Зеленцов В.В. Щеглов Г.А. Основы компоновки бортового оборудования космических аппаратов. – М.: МВТУ им. Н.Э. Баумана, 2010.
6. Малые космические аппараты информационного обеспечения / Под ред.

- докт. тех. наук, засл. деятеля наук РФ, проф. В.Ф. Фатеева. – М.: Радиотехника, 2010. – 320 с., ил.
7. Поздняков А.Ю. [и др.]. Создание комплекса математических моделей для исследования функционирования различных информационных средств наблюдения космических объектов. НТО о НИР «Скаут-ККП». – М.: ВИ МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011, - 41 с.
  8. Поздняков А.Ю. [и др.]. Предварительное обоснование орбитального построения космического сегмента СККП. Молодёжный научно-технический вестник. – М.: ВИ МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011, - <http://sntbul.bmstu.ru/authors/532658.html>
  9. В. Фатеев, С. Суханов. Концепция развития РКО России. <http://www.vko.ru/DesktopModules/Articles/ArticlesView.aspx?tabID=320&ItemID=63&mid=2892&wversion=Staging>
  10. Поздняков А.Ю., Старчак С.Л. [и др.] Создание комплекса математических моделей для исследования функционирования различных информационных средств наблюдения космических объектов. НТО о НИР «Скаут-ККП». – М.: ВИ МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012, - 71 с.