

На правах рукописи

РАЙКУНОВ Константин Геннадьевич

**ОБОСНОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И РАЗРАБОТКА ОСНОВ
БАЛЛИСТИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ОРБИТАЛЬНОГО СЕГМЕНТА
ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ АСТЕРОИДНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ
ЗЕМЛИ**

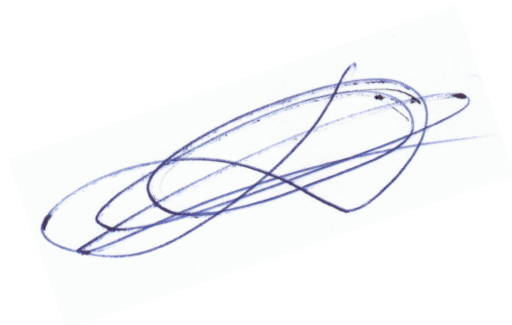
Специальность 05.07.09

Динамика, баллистика и управление движением летательных аппаратов

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук



Москва - 2016

Работа выполнена в «Московском государственном техническом университете» имени Н.Э. Баумана

Научный руководитель: Заслуженный деятель науки РФ, д.т.н., профессор кафедры Динамики и управления полётом ракет и космических аппаратов МГТУ им. Н. Э. Баумана **Лысенко Лев Николаевич**,

Официальные оппоненты: **Аверкиев Николай Федорович**, д.т.н., профессор кафедры навигационно – баллистического обеспечения применения космических средств и теории полётов летательных аппаратов ВКА им. А. Ф. Можайского (г. Санкт – Петербург)

Забокрицкий Александр Владимирович, д.т.н., профессор, гл. науч. сотрудник НИЦ ЦНИИ ВВКО Минобороны РФ (г. Королёв, МО.)

Ведущая организация: ОАО «Корпорация космических систем специального назначения «Комета» (г. Москва)

Защита диссертации состоится «13» октября 2016 года в «14:30» на заседании диссертационного совета Д 212.141.22 при Московском государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана по адресу: 105005, Москва, Госпитальный переулок, дом 10, факультет Специального машиностроения МГТУ им. Н.Э. Баумана, ауд. 407 м.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте www.bmstu.ru МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Автореферат разослан «___» _____ 2016 года.

Отзывы, заверенные гербовой печатью, просьба направлять по адресу: 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, МГТУ им. Н.Э. Баумана, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.141.22.

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

Луценко А.Ю.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Ретроспективный анализ накопленных данных показал, что на протяжении истории существования Земли на неё падало огромное количество космических тел разного размера и состава, которые приводили к различным, в том числе катастрофическим, последствиям.

При этом есть основания утверждать, что падение на Землю космических тел, несмотря на значительные сложности, можно заранее предсказать и попытаться предотвратить.

Однако сегодня обнаружение и наблюдение астероидов, сближающихся с Землёй (АСЗ), возможно только на достаточно малых дистанциях от её поверхности. Не умоляя значимости, важности и необходимости построения наземной подсистемы информационного обеспечения астероидной безопасности Земли (АБЗ), отметим, что она не в состоянии в полной мере решить поставленную задачу.

В связи с актуальностью и сложностью проблемы информационного обеспечения системы АБЗ, её решением занимается во всем мире достаточно большое количество специалистов различного профиля.

В ряде работ сделан вывод о целесообразности создания орбитальных средств обнаружения, наблюдения и регистрации АСЗ, особенно потенциально опасных объектов (ПОО), чьи орбиты сближаются с орбитой Земли до расстояния, не превышающего 0.05 а.е.

Информационная подсистема орбитального базирования может существенно повысить и дополнить информационные возможности наземной подсистемы. За счёт выбора рациональной баллистической структуры орбитальной информационной подсистемы (ОИП) она может обеспечить не только требуемую оперативность обнаружения, но и наблюдение астероидов в наиболее благоприятных условиях с различных ракурсов, в том числе без засветки Солнцем и зависимости от атмосферы и состояния метеоусловий.

В связи с этим актуальность разработки подходов определения требований, характеристик и схем построения ОИП является очевидной.

В настоящее время, несмотря на интенсивные проработки, опубликованных работ и полученных результатов в этом направлении явно недостаточно. К наиболее значимым из них следует отнести работы Барабанова С.Н., Волкова В.А, Дегтяря В.Г., Емельянова В.А., Ёлкина К.С., Захарова А. И., Кулешова Ю.П., Мисника В.П., Прохорова М. Е., Рыхловой Л.В., Черных Н. С., Шора В.А., Шугарова С.Ю., Шустова Б.М., Энеева Т. М. и некоторых других. Однако, несмотря на большую научную ценность указанных работ, в них не ставилась комплексная научно – техническая задача обоснования рационального баллистического построения ОИП, определения требований, характеристик и схем построения, моделирования орбитального информационного сегмента системы астероидной безопасности Земли с целью обнаружения за заданное время, и наблюдения различных классов АСЗ, в том числе, с низкими значениями альбедо. Без решения такой задачи создание ОИП представляется проблематичным.

Объект исследования. Объектом исследования в диссертации является перспективная орбитальная информационная подсистема обеспечения астероидной безопасности Земли.

Предметом исследования служит разработка методов, методик, моделей и получаемые на их основе численные результаты, представляющие собой в совокупности основу баллистического обеспечения орбитальной подсистемы информационного обеспечения астероидной безопасности Земли на стадии поисково – исследовательского уровня её проектирования.

Целью работы является повышение информативности перспективной системы астероидной безопасности Земли, предназначенной для своевременного обнаружения, наблюдения и регистрации потенциально опасных астероидов с заданными параметрами, движущихся по траекториям столкновения с Землей.

Для достижения поставленной цели потребовалось решить следующие задачи.

1. Определить предварительные функциональные требования к орбитальной информационной подсистеме обеспечения астероидной безопасности Земли.

2. Разработать приближенную спектрально-энергетическую модель астероида для математического моделирования и численных оценок различных альтернатив построения баллистической структуры ОИП.

3. Исследовать и оценить необходимую дальность обнаружения и наблюдения астероидов, движущихся по траекториям столкновения с Землёй.

4. Исследовать и обосновать рациональные варианты баллистического построения группировки КА с телескопами видимого и инфракрасного диапазона для обеспечения благоприятных условий обнаружения и наблюдения астероидов, а также определения их физико-химических свойств.

5. Оценить возможности использования орбит, проходящих в окрестности точки либрации L_2 системы «Солнце – Земля», для организации синхронно – базисных наблюдений.

6. Промоделировать функционирование ОИП и проанализировать результаты сеансов обнаружения и наблюдения ПОО, находящихся на столкновительных траекториях с Землёй, с целью подтверждения выработанных требований к баллистическому построению и основным характеристикам ОИП.

Методы исследования. Основными методами исследования, используемыми в работе, являются методы механики космического полета; системный анализ; методы численного математического моделирования. При программно-алгоритмической реализации математического обеспечения используются методы объектно-ориентированного программирования.

Научная новизна результатов диссертации заключается в следующем:

- разработана, с использованием известных физико-математических соотношений, приближённая математическая модель спектро – энергетических характеристик излучения (СЭХИ) астероидов;

- обоснованы выбор рациональной баллистической структуры группировки КА с телескопами видимого диапазона для обнаружения и наблюдения астероидов, а также рациональные варианты баллистического построения группировки КА с телескопами инфракрасного диапазона для определения

физико – химических свойств астероидов;

- разработана математическая модель функционирования ОИП, позволяющая подтвердить её основные предварительные характеристики, полученные в результате исследования;

- разработано программно – алгоритмическое обеспечение имитационного моделирования, при помощи которого подтверждены основные характеристики функционирования ОИП, планирования сеансов обнаружения и наблюдения столкновительных астероидов, позволяющие проводить дальнейшее уточнение параметров облика системы;

- показана возможность обнаружения столкновительных астероидов диаметрами 50 метров с альбедо 5% за 35 и более суток до столкновения с Землёй при помощи орбитальных телескопов с апертурами порядка 2 метров и полями зрения от 3°, что принципиально позволяет решать задачу защиты Земли от АСЗ.

Практическая значимость диссертации заключается в том, что разработанные предложения по вариантам баллистических структур ОИП КА с телескопами видимого и ИК диапазонов длин волн и их алгоритмическое баллистическое обеспечение востребованы в процессе предварительных проработок вариантов создания отечественной системы обеспечения астероидной безопасности Земли, а созданное программно – алгоритмическое обеспечение нашло применение для численного моделирования проектируемой перспективной системы.

Достоверность и обоснованность научных положений и полученных результатов подтверждается:

- применением строгих математических методов, базирующихся на фундаментальных и классических законах механики;

- применением апробированных современных численных методов и алгоритмов исследований;

- совпадением отдельных результатов модельных расчётов, полученных в диссертации, с данными расчётов других авторов.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту.

1. Обоснование выбора рациональной баллистической структуры перспективной орбитальной информационной подсистемы КА с телескопами видимого диапазона, обеспечивающей благоприятные условия наблюдения, а также рациональных вариантов баллистического построения орбитальной информационной подсистемы КА с телескопами инфракрасного диапазона для определения физико – химических свойств астероидов на основе предложенной приближённой спектрально – энергетической модели астероида.

2. Результаты оценки требуемых дальностей обнаружения для астероидов, движущихся по траекториям столкновения с Землёй.

3. Результаты анализа возможностей использования орбит, проходящих в окрестности точек либрации L_2 системы «Солнце – Земля», для организации синхронно – базисных наблюдений.

4. Имитационная модель, позволившая оценить и подтвердить основные характеристики функционирования для полученного предварительного облика

ОИП.

5. Комплекс программно – алгоритмического обеспечения и полученные на его основе качественные и количественные результаты проектно – баллистического анализа ОИП.

Внедрение результатов диссертационной работы. Результаты работы реализованы в 6 научно-технических отчётах по СЧ НИР «Магистраль» (Облик) и СЧ НИР «Магистраль» (Облик-АКА) по ТЗ Федерального Космического Агентства, что подтверждается актом о внедрении результатов диссертационного исследования в работах ФГУП ЦНИИмаш.

Апробация работы и публикации. Результаты работы докладывались и получили одобрение на отечественных и международных научно – технических конференциях:

- XXXVIII Академических чтений по Космонавтике, посвящённых памяти С.П. Королёва в МГТУ им. Н.Э. Баумана (Москва, 2014 г.),
- XXXIX Академических чтений по Космонавтике, посвящённых памяти С.П. Королёва в МГТУ им. Н.Э. Баумана (Москва, 2015 г.),
- IX Международной конференции «Околоземная астрономия» (Терскол, 2015 г.).

Результаты по теме диссертации опубликованы в 6 статьях [1 – 6] в изданиях, входящих в перечень ВАК Минобрнауки России, в 3 сборниках тезисов докладов и трудов конференций [7 – 9]. Общий объём: 5.42/3.83 п. л.

Личный вклад автора. Все результаты, представленные в диссертации, получены автором лично. Вклад автора состоит в формулировке задач исследования, разработке методов, методик и программного обеспечения для их решения, в обработке, анализе, обобщении полученных результатов и формулировке выводов.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка сокращений, списка литературы и приложения. Общий объем диссертации 143 страницы, содержит 92 рисунка и 4 таблицы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, приведены обзор и анализ состояния работ по данному направлению, определены объект и предмет исследований, сформулированы цель и задачи работы, показана научная новизна и практическая значимость результатов диссертации, приведены основные положения, выносимые на защиту, и сведения об апробации результатов диссертации.

В первой главе ставится задача разработки исходных данных (ИД), на базе которых формируются обобщённые функциональные требования к перспективной орбитальной информационной подсистеме и требования к её рациональной баллистической структуре. При разработке ИД определяющими являются спектро – энергетические (СЭХИ) и пространственно – временные (ПВХИ) характеристики излучения астероидов I_{λ}^a . Для излучения астероидов в видимом диапазоне это, в первую очередь, отражённое излучение Солнца $I_{\lambda}^{a_{отр}}$, которое определяется физико – химическими свойствами астероидов (ρ –

альбедо, ε – степень черноты, $f(\varphi)$ – функция диффузного рассеивания отражённого солнечного излучения), углом фазы φ – углом при астероиде между направлениями на Солнце и наблюдателя (телескоп) и углом элонгации ψ – углом при наблюдателе (телескопе) между направлениями на Солнце и астероид. Для излучения астероидов в ИК диапазоне это собственное излучение астероида $I_{\lambda}^{a_{\text{собст}}}$. Таким образом, СЭХИ астероида можно определить как $I_{\lambda}^a = I_{\lambda}^{a_{\text{отр}}} + I_{\lambda}^{a_{\text{собст}}}$. На телескоп с диаметром входного зрачка $D_{\text{вх}}$, находящийся на расстоянии L_{a-t} от астероида диаметром d_a , в диапазоне длин волн наблюдения от λ_1 до λ_2 может приходиться поток излучения F^{a-t} :

$$F^{a-t} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\rho I_{\lambda}^c \pi d_a^2 D_{\text{вх}}^2}{16 L_{a-t}^2} f(\varphi) d\lambda + \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\varepsilon R_{\lambda,T} \pi d_a^2 D_{\text{вх}}^2}{16 L_{a-t}^2} d\lambda, \quad (1)$$

где $R_{\lambda,T}$ – функция Планка, I_{λ}^c – монохроматическая сила излучения Солнца.

Реальный поток излучения (ПВХИ) на входном зрачке определяется, в том числе, углами фазы астероидов и элонгации наблюдателя.

Кроме того, обнаружение и наблюдение астероида зависит от проникающей силы телескопа, которая определяется апертурой и параметрами матрицы телескопа, а также временем t_n экспозиции астероида и параметрами движения изображения астероида по матрице телескопа.

В соответствии с общепринятой «концепцией системы противодействия космическим угрозам» (Кулешов Ю.П., Рыхлова Л.В., Шустов Б.М. и другие), в работе время от обнаружения АСЗ до момента возможного столкновения с Землёй, которое определяет требование к дальности обнаружения АСЗ, принято равным 35 суткам.

Для получения указанных ИД в диссертации на основе известных физико-математических соотношений разработана и программно реализована приближённая математическая модель оценки СЭХИ и ПВХИ астероидов.

Результаты расчётов с помощью данной математической модели использованы для формирования пакета исходных данных при выборе рационального облика ОИП, а также обоснования целесообразности использования телескопов видимого диапазона длин волн для обнаружения астероидов в ходе постоянного непрерывного сканирования небесной сферы, прогноза параметров их движения и использования ИК диапазона длин волн для оценки физико-химических характеристик астероидов, включая температуру их поверхности по предварительному целеуказанию. Показано, что для АСЗ с низким альбедо собственное излучение в ИК области спектра может значительно превосходить отражённое излучение (Рис. 1; 2). Однако, использование ИК телескопов для постоянного регулярного сканирования в этом случае затруднительно из-за технических ограничений.

Таким образом, обоснована целесообразность использования в составе ОИП оптических средств видимого и ИК диапазонов длин волн.

На основании ИД в настоящей работе разработан алгоритм оценки требуемой дальности обнаружения ПОО.

В результате применения указанного алгоритма с использованием полученных ИД, за обобщённую требуемую дальность обнаружения $R_{\text{бар}}$ АСЗ

предложено принять дистанцию (Рис. 3) порядка 0.85 - 1 а.е. от точки E' их возможного столкновения с Землёй. Сфера с центром в точке E' радиусом $R_{\text{бар}}$ определяет так называемую «барьерную зону».

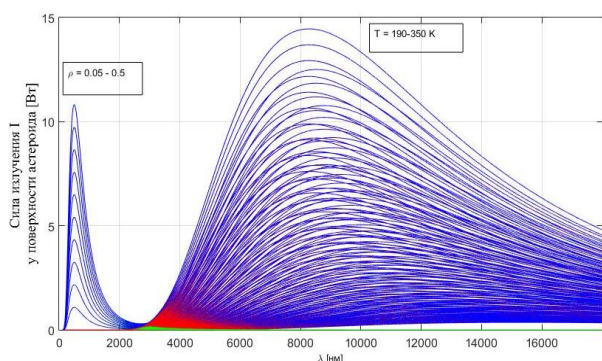


Рис. 1. Сила излучения у поверхности астероида при различных значениях альбедо и температуры астероида в зависимости от длины волны.

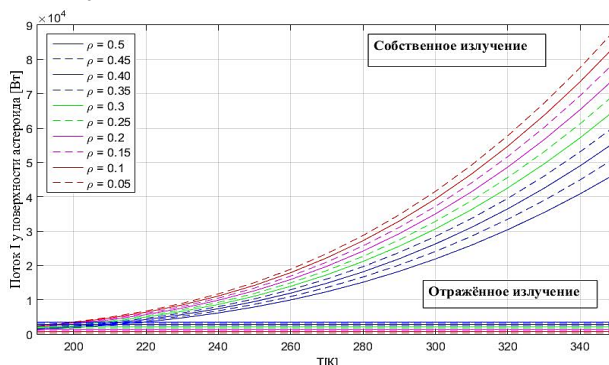
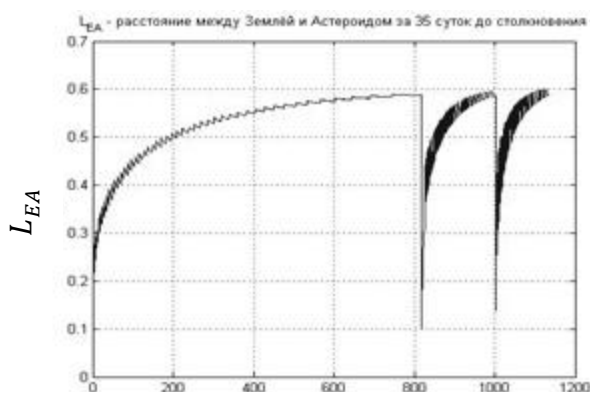
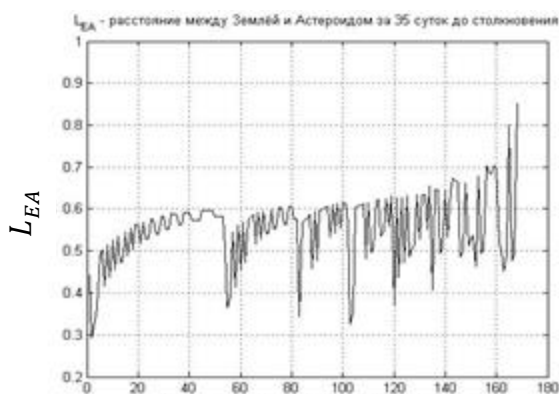


Рис. 2. Соотношение между потоками отраженного (0.38 – 0.78 мкм) при $\varphi = 90^\circ$ и собственного излучения (6.0 – 13.0 мкм) для $d_a = 30$ м и $L_{a-c} = 1$ а.е.



Номер промоделированной орбиты

(а)



Номер промоделированной орбиты

(б)

Рис. 3. Требования к дальности обнаружения астероидов класса Атиры (а) и Атона (б) за 35 суток до столкновения с Землёй

В результате сформулированы основные обобщённые функциональные требования к ОИП – обнаружение астероидов:

- с альбедо от 0.05 и более;
- диаметром 50 метров и более;
- за 35 суток до возможного столкновения с Землёй;
- на дальностях $R_{\text{бар}}$ порядка 0.8 - 1 а.е. от точек возможного столкновения АСЗ с Землёй;

а также:

- обеспечение возможности постоянного непрерывного сканирования «барьерной зоны»;
- оценка физико-химических параметров астероидов.

Во второй главе ставится основная задача обоснования и выбора на основе разработанных в первой главе ИД и функциональных требований к ОИП рациональной баллистической структуры ОИП.

Для решения поставленной задачи определены ограничения на типы и

параметры орбит КА с целью минимизации времени засветки телескопов Солнцем и, тем самым, максимизации времени экспозиции астероидов и наблюдаемой части небесной сферы. Для КА с аппаратурой ИК диапазона длин волн для гарантированного наблюдения астероидов без засветки от Солнца угол элонгации должен превышать $80^\circ - 90^\circ$. Для КА с аппаратурой видимого диапазона длин волн ограничения по минимальному допустимому углу элонгации более мягкие и составляют 30° .

Анализ показал, что для обеспечения оперативности обзора и решения задачи на технически достижимом уровне необходимо сформировать баллистическую структуру группировки КА так, чтобы минимизировать, по возможности, углы фазы при наблюдаемых астероидах и дальности от них до наблюдателя. Это позволяет увеличить облучённость входного зрачка телескопа от наблюдаемых астероидов и, тем самым, уменьшить требуемое время экспозиции, что в сумме равносильно уменьшению наблюдаемых звёздных величин m_a астероидов. Таким образом, необходимо так построить баллистическую структуру группировки КА, чтобы обеспечить указанные благоприятные условия наблюдения.

В работе показано, что проникающая сила телескопа пропорциональна величине $\lg\sqrt{St_n}$ при фиксированных остальных параметрах, а потребное время накопления сигнала t_n изменяется пропорционально величине $10^{m_a}/S$.

Как показали расчёты, в качестве базовой баллистической структуры группировки КА целесообразно выбрать гелиоцентрическую орбиту Земли.

Для построения рациональной баллистической структуры группировки КА, расположенных на гелиоцентрической орбите Земли, рассмотрено их размещение внутри «барьерной сферы» на расстоянии от 0.01 а.е. до 1.35 а.е. впереди Земли по ходу её движения и на расстоянии от 0.01 до 0.25 а.е. позади Земли по ходу её движения. Такие ограничения обусловлены не только возрастанием предельной дальности наблюдения L_{a-t} при увеличении расстояния Земля – КА, но и быстрым ростом угла фазы φ астероидов, расположенных на барьерной сфере, что приводит к росту требуемой проникающей силы телескопа при сканировании барьерной сферы.

Для каждого моделируемого i -го положения КА на гелиоцентрической орбите (L_{t-E}^i - расстояние от КА до Земли) построено распределение наблюдаемых звёздных величин астероидов, расположенных на расстоянии 1 а.е. от ожидаемого положения Земли в момент столкновения с астероидом (E'), которые определяют требуемые проникающие силы телескопов (Рис. 4). Здесь синим цветом изображены требуемые проникающие силы при наблюдении с КА, расположенного впереди Земли на расстоянии от 0.6 а.е. до 1.35 а.е., зелёным цветом – на расстоянии от 0.01 а.е. до 0.6 а.е., чёрным обозначены требуемые проникающие силы при наблюдении с КА, расположенного позади Земли, красным цветом изображены требуемые проникающие силы при одновременном наблюдении с каждого из двух КА, находящихся на рациональном удалении от Земли по предложенному в данной главе методу для двух КА.

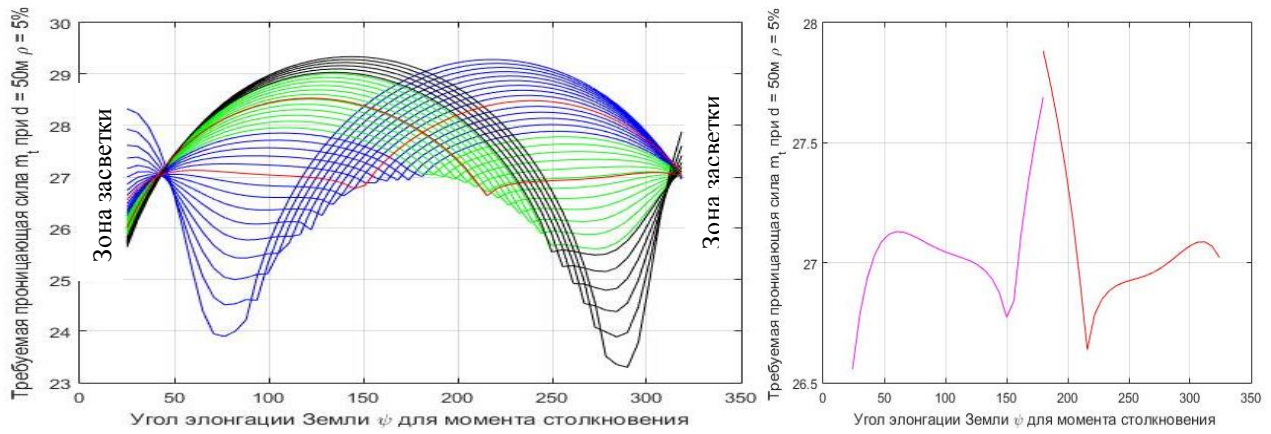


Рис. 4. Требуемые проникающие силы телескопов при наблюдении с гелиоцентрических орбит Земли в зависимости от удаления КА от Земли и угла элонгации Земли в момент столкновения с астероидом

Одним из определяющих факторов для обоснования рациональной баллистической структуры и основных характеристик функционирования ОИП является выбор алгоритма сканирования телескопами КА поверхности «барьерной сферы». В связи с чем, в работе предложен соответствующий алгоритм сканирования, который упрощённо может быть описан следующим образом. Вся поверхность «барьерной зоны» разбивается на N равных зон, определяемых полем зрения телескопа. Эти зоны последовательно сканируются телескопом. В каждой j -ой зоне ожидается возможное появление астероида звездной величины m_a^j , что требует времени экспозиции этой зоны равного t_{hj} . Время t_{hj} в степенной зависимости от звёздной величины m_a^j : $t_{hj} \sim 10^{m_a^j}$. Тогда, полное время экспозиции всей поверхности «барьерной зоны» будет равно T_Σ или, что равносильно, если ввести некоторую безразмерную величину $t_{эКВ}$:

$$t_{hj} = \left(k\Delta \cdot 10^{\left(\frac{m_a^j - 7.1 - 0.5\mu}{2.5} \right)} \right)^2 / S\eta, \quad T_\Sigma = \sum_{j=1}^N t_{hj} \sim \sum_{j=1}^N 10^{m_a^j}, \quad t_{эКВ} = \sum_{j=1}^N 10^{m_a^j},$$

где S – эффективная площадь входного зрачка телескопа в см^2 ; η – квантовая эффективность фотоприёмной матрицы; t_h – время накопления сигнала в секундах; Δ – число пикселей, накрываемых изображением объекта на матрице; k – отношение сигнала к шуму; μ – яркость зодиакального света в звёздных величинах.

В работе в качестве основных рассматриваемых классов выбраны АААА (Атоны, Атиры, Аполлоны, Амуры) астероиды. В качестве критических рассмотрены астероиды класса Атиры, движущиеся со стороны Солнца внутри гелиоцентрической орбиты Земли. Эти астероиды лишь кратковременно выходят из зоны засветки Солнцем, что требует максимально быстрого просмотра «барьерной зоны» телескопом с целью своевременного обнаружения и пролонгации их орбит.

Отсюда следует, что в качестве критерия для нахождения рационального удаления КА от Земли ($L_{t-E}^{\text{рац}}$), целесообразно выбрать минимум безразмерного

эквивалента $t_{\text{экв}}$ интегрального потребного времени экспозиции $\sum_{j=1}^N t_{nj}$ всех N зон, находящихся на поверхности «барьерной сферы», т.е.

$$t_{\text{экв}} = (\sum_{j=1}^N 10^{m_a^j(L_{t-E}^i)}) \rightarrow \min_i. \quad (2)$$

Выбор данного критерия обусловлен потребностью не только как можно быстрее, но и чаще осматривать «барьерную сферу» как для уменьшения временного интервала между пересечением астероидом «барьерной сферы» и его обнаружением, так и для увеличения числа сеансов наблюдения ПОО, которое влияет на точность определения параметров их орбит.

Кроме того, минимизация необходимого суммарного времени экспозиции позволяет снизить требуемую проникающую силу. Снижение требуемой проникающей силы телескопа позволяет уменьшить требования к апертуре до технически реализуемых на базе существующих технологий, что ведёт и к снижению массы КА.

В случае двух КА критерий принимает вид:

$$\left[\min_i \left(\sum_{j=1}^{j=\psi_{\text{гран}}^{\text{рац}}} 10^{m_a^j(L_{t-E}^i)} \right) + \min_i \left(\sum_{j=\psi_{\text{гран}}^{\text{рац}}}^{j=N} 10^{m_a^j(L_{t-E}^i)} \right) \right] \rightarrow \min_{\psi_{\text{гран}}^{\text{рац}}}, \quad (3)$$

где $\psi_{\text{гран}}^{\text{рац}}$ – рациональная граница между областями патрулирования КА.

В результате математического моделирования с использованием указанного критерия находим для первого $L_{t-E}^{\text{рац}_1}$ и второго КА $L_{t-E}^{\text{рац}_2}$ такие удаления от Земли, для которых минимальное значение $t_{\text{экв}}$ для обнаружения АСЗ будет меньше, чем для других взаимных расположений КА. Иными словами, для обнаружения АСЗ, имеющих вычисленные наблюдаемые звёздные величины, потребуется минимальное время экспозиции всей области наблюдения.

Результаты математического моделирования в соответствии с приведёнными алгоритмами показали следующее.

В случае использования только одного КА при его размещении впереди Земли по ходу её движения критерий $t_{\text{экв}}$ составляет величину $2.31 \cdot 10^{29}$. Это соответствует расположению КА впереди Земли на удалении ~ 0.6 а.е. При размещении КА позади Земли по ходу её движения – $t_{\text{экв}} = 1.77 \cdot 10^{30}$, что почти на порядок больше, чем для опережающего КА. Это свидетельствует о нецелесообразности использования КА позади Земли по сравнению с опережающим КА. Нецелесообразно также использовать в рассматриваемом случае точку либрации L_2 системы «Солнце – Земля», так как в этом случае $t_{\text{экв}} = 1.52 \cdot 10^{30}$. Этот же вывод справедлив и для других околоземных орбит.

При наблюдении с двух КА минимум безразмерного эквивалента $t_{\text{экв}}$ составит $7.4 \cdot 10^{28}$, что достигается при размещении двух «опережающих» КА на удалениях 0.3 а.е. и 0.85 а.е. от Земли. Таким образом, при использовании двух КА, минимум безразмерного эквивалента $t_{\text{экв}}$ по выбранному критерию почти в 3 раза меньше, чем при использовании одного КА за счет их рационального расположения. Граница разделения суммарного поля зрения для этих двух КА проходит по углу $\psi_{\text{гран}}^{\text{рац}} = 180$ градусов при наблюдении с Земли в момент

возможной встречи с астероидом. Максимальная требуемая проникающая сила двух орбитальных телескопов составляет менее 28 звёздной величины. При этом, примерно 85% сканируемой области потребует проникающую силу телескопа на уровне до 27.2 звёздных величин.

Для обеспечения требуемой точности определения параметров орбит АСЗ рационально использовать синхронно – базисные наблюдения, т.е. определять параметры орбит АСЗ по синхронным наблюдениям с нескольких разнесённых на большие дистанции пунктов наблюдения. Размещение дополнительного КА (телескопа) в точке либрации L_2 системы «Солнце – Земля» является возможным перспективным решением для организации синхронно – базисных наблюдений в паре с телескопами видимого диапазона на гелиоцентрической орбите Земли. Такой вариант позволяет получить измерения с базой порядка 0.3 и 0.8 а.е. для выбранной баллистической структуры КА с телескопами видимого диапазона. В результате математического моделирования оценены потребные точности определения базы между КА для синхронно – базисного определения параметров орбит ПОО в течение нескольких дней с момента первого обнаружения с точностью, достаточной для классификации их как ПОО (Рис. 5).

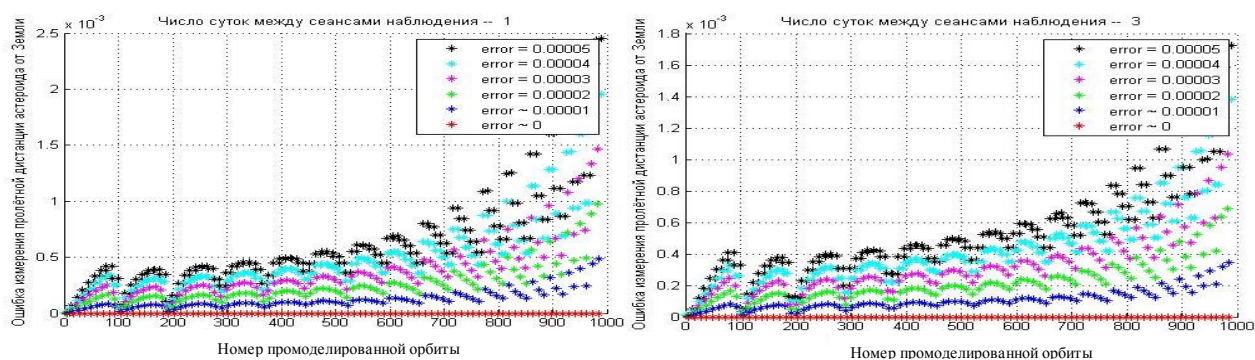


Рис. 5. Влияние ошибки измерения базы между телескопом на удалении 0.3 а.е. от Земли и дополнительным телескопом в точке либрации L_2 системы «Солнце – Земля» на ошибку измерения пролётной дистанции между астероидом класса Атона и Землёй при синхронно – базисных наблюдениях.

При исследовании вариантов баллистического построения КА с ИК телескопами проведено численное моделирование потоков отражённого от АСЗ солнечного и собственного излучений, приходящих на входной зрачок ИК телескопа. Показано, что для наблюдения малых АСЗ, находящихся внутри орбиты Земли ($L_{a,s} < 1$ а.е.) и имеющих температуру поверхности $> 235K$, рационально размещение КА с ИК телескопами на гелиоцентрических орбитах в окрестности точки либрации L_2 системы «Солнце – Венера». При этом наблюдения целесообразно проводить в спектральном диапазоне 6 – 13 мкм, где поток собственного излучения для таких тел превышает поток отражённого солнечного излучения. Однако, сегодня этот вариант труднореализуем.

Наблюдение тел, находящихся на расстояниях, превышающих 1 а.е. от Солнца ($L_{a,s} > 1$ а.е.), и имеющих температуру $> 137K - 158K$, целесообразно проводить в более длинноволновом спектральном диапазоне 6 – 18 мкм. В этом случае обеспечивается значительное превышение потока собственного

излучения АСЗ, находящихся на удалении ($1 \text{ а.е.} < L_{a_s} < 3 \text{ а.е.}$) от Солнца, над потоком отражённого солнечного излучения даже при значительно меньших температурах ($>137\text{К} - 158\text{К}$) АСЗ. Показано, что для наблюдения этих АСЗ рационально размещение КА с ИК телескопом на гелиоцентрических орбитах в окрестности точки либрации L_2 системы «Солнце – Земля». При этом возможно обнаружение малых АСЗ с низкой отражательной способностью даже меньшего диаметра, чем в видимом диапазоне.

Для обнаружения малых АСЗ, находящихся на дистанциях более 4 а.е. от Солнца, необходимо использовать дальний ИК диапазон. Однако в настоящее время разработка ФПУ дальнего ИК-диапазона представляет сложную проблему.

Показано, что по сравнению с гелиоцентрической орбитой венерианского типа или гелиоцентрической орбитой Земли, теоретически совместное использование точек либрации L_2 систем «Солнце – Венера» и «Солнце – Земля» обладает преимуществами. При расположении ИК телескопа в точке либрации L_2 системы Солнце – Земля, он защищён от засветки Земли и Луны и при этом находится в прямой зоне видимости наземных измерительных пунктов, то есть может работать совместно с наземным сегментом.

В третьей главе ставится задача разработки имитационной модели (ИМ) функционирования ОИП с целью оценки и подтверждения обоснованности и правильности выбора основных характеристик предварительно синтезированного облика ОИП. Имитационное моделирование позволяет учесть множество факторов, которые сложно учесть в аналитических моделях, а также те, которые в наибольшей степени влияют на эффективность функционирования ОИП, а значит и на её облик.

В рамках ИМ были рассмотрены относительные движения во времени астероидов, КА, Земли, «барьерной сферы». Имитационное моделирование относительного движения рассматриваемых объектов позволило оценить количество сеансов наблюдения и периоды времени от попадания АСЗ в поле зрения орбитальных телескопов до столкновения с Землёй. При моделировании варьировались размеры мгновенного поля зрения, апертуры и другие параметры телескопов. Это позволило оценить скорости движения изображения АСЗ в плоскости матрицы телескопов, оценить потребные размеры пикселей матрицы, выявить взаимосвязь целевых характеристик, таких как апертура, размер поля зрения, скорость и периодичность покрытия барьерной зоны и другие.

Предложен алгоритм сканирования «барьерной сферы» и его реализация в итерационном формате. Алгоритм сканирования играет кардинальную роль при определении количества КА в группировке, параметров их орбит, основных характеристик телескопов.

Проведены оценки требуемого суммарного времени экспозиции патрулируемой области и времен экспозиции каждой зоны указанной области орбитальными телескопами в зависимости от диаметра входного зрачка и размера его поля зрения. Предложена методика определения попадания и выхода астероида из поля зрения орбитального телескопа.

Расширен метод построения плоской «карты экспозиций» для орбитальных телескопов в зависимости от сферических координат наблюдаемой зоны на сканируемой области небесной сферы. В отличие от предложенного во второй главе способа построения плоской «карты экспозиций» для наблюдения астероидов в плоскости эклиптики, в данной главе рассмотрено её пространственное построение для всей патрулируемой области, что позволяет рассчитывать требуемую проникающую силу телескопов для наблюдения АСЗ на орбитах, в том числе, с ненулевым наклоном.

Использование рассмотренных в главе методик, алгоритмов и математических моделей позволяет оценить возможности ОИП по обнаружению и наблюдению различных классов астероидов, которые могут столкнуться с Землёй.

В четвертой главе ставится задача подтверждения путём имитационного моделирования правильности задания основных обобщённых функциональных требований к ОИП, сформированных в первой главе, а также выбора баллистической структуры и основных характеристик функционирования ОИП, включая планирование сеансов обнаружения и наблюдения АСЗ, полученных во второй главе.

Для моделирования функционирования выбранной орбитальной группировки КА с телескопами видимого диапазона разработаны библиотеки для среды Matlab на базе моделей, представленных в главе 3. Данные программные библиотеки позволяют провести моделирование функционирования орбитальной группировки и, в том числе, оценить параметры сеансов обнаружения различных классов АСЗ и ПОО, варьируя характеристики оптических телескопов и их фотоприёмных матриц. Пример трёхмерной визуализации работы данных библиотек при синхронном моделировании 14 орбит астероидов, 2 орбитальных телескопов и их переориентации в пространстве, включая перемещение полей зрения для реализации заданного алгоритма сканирования, представлен на Рис. 6.

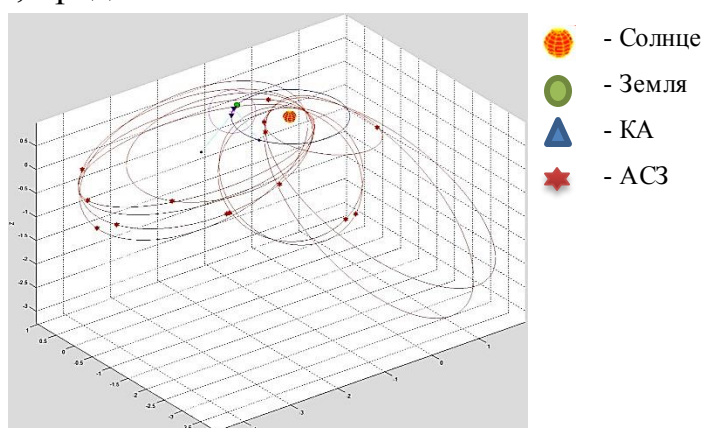


Рис. 6. Процесс визуализации трёхмерного моделирования 14 орбит, двух орбитальных телескопов и положения их оптических осей в разработанных библиотеках для среды Matlab.

Результаты моделирования показали, что наиболее сложным классом астероидов для наблюдения является класс астероидов Атиры, орбиты которых

полностью лежат внутри орбиты Земли. Наблюдение таких астероидов при помощи наземных оптических средств затруднено из-за засветки Солнцем. Наблюдение астероидов классов Атона и Аполлона представляется более простой задачей.

По результатам моделирования оценена доступность для наблюдения АСЗ, т.е. частота попадания АСЗ в кадр телескопа и его нахождения при этом вне зоны засветки Солнцем. На Рис. 7, в качестве примера, приведено число попаданий АСЗ класса Атиры в поле зрения телескопа с апертурой 3 м и полем зрения 3 градуса. Установлено, что в случае базирования двух КА на гелиоцентрической орбите впереди Земли по ходу её движения, дальний от Земли КА более эффективен для обнаружения АСЗ на орбитах обратного движения, а ближний к Земле КА – для обнаружения АСЗ на орбитах прямого движения.

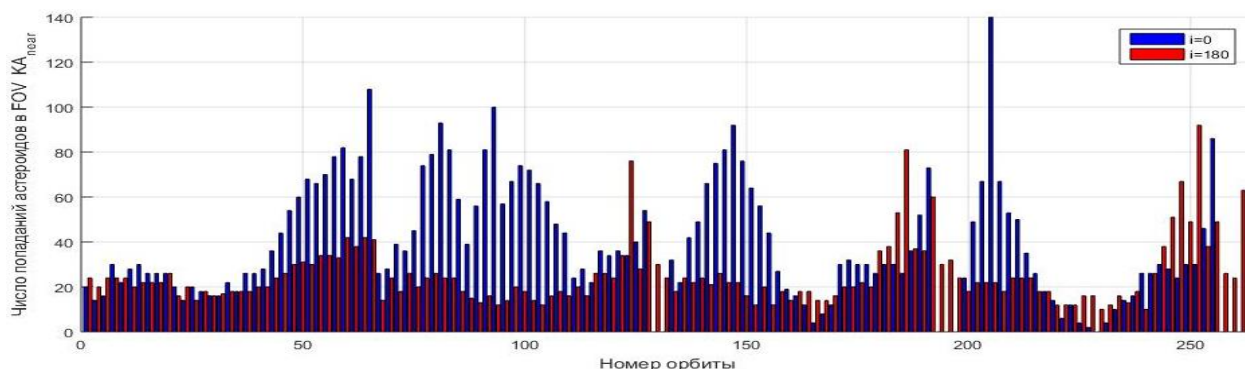


Рис. 7. Число попаданий в поле зрения ближнего к Земле КА ($D_{in} = 3$ м) астероидов класса Атиры с наклоном $i = 0^\circ$ и $i = 180^\circ$ в зависимости от номера промоделированной орбиты астероида.

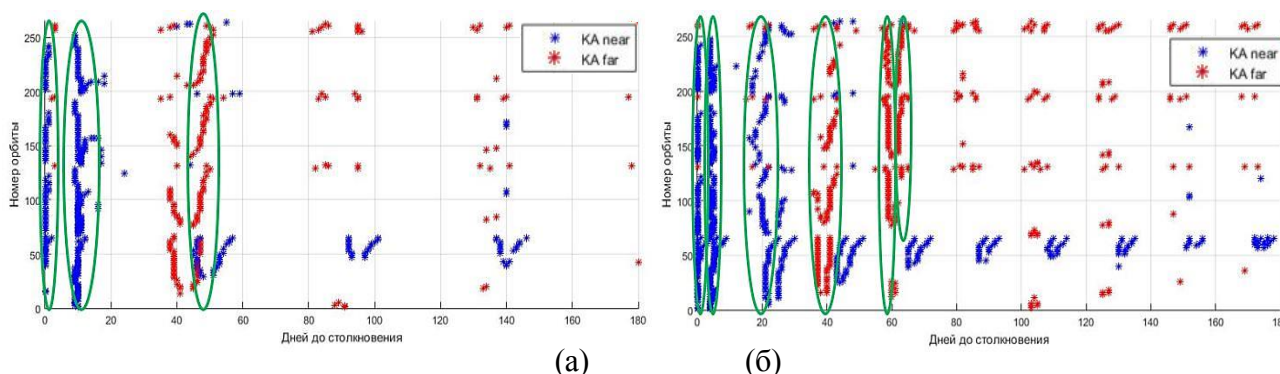


Рис. 8. Распределение по времени сеансов регистрации орбитальным телескопом $D_{in} = 2$ м (а) и $D_{in} = 3$ м (б) астероидов класса Атиры на различных моделируемых орбитах на интервале 180 суток до столкновения с Землёй.

На Рис. 8 представлено распределение по времени сеансов регистрации астероидов класса Атиры, а на Рис. 9 астероидов классов Атона и Аполлона орбитальными телескопами с различной апертурой. Здесь зелёным выделены области, соответствующие сеансам регистрации подавляющего большинства астероидов, движущихся по моделируемым столкновительным с Землёй орбитам.

Имитационное моделирование сеансов наблюдения астероидов позволило определить длины и времена пробегов изображений астероидов по плоскости матрицы телескопа в зависимости от фокусного расстояния телескопа, его поля зрения, размеров матрицы и её пикселя. Это дало возможность предварительного обоснования основных характеристик телескопов. В частности, при сборе всего потока излучения на минимальном количестве пикселей можно достичь максимальной проникающей силы телескопа за время экспозиции. При размытии полезного сигнала на большее количество пикселей проникающая сила телескопа уменьшается.

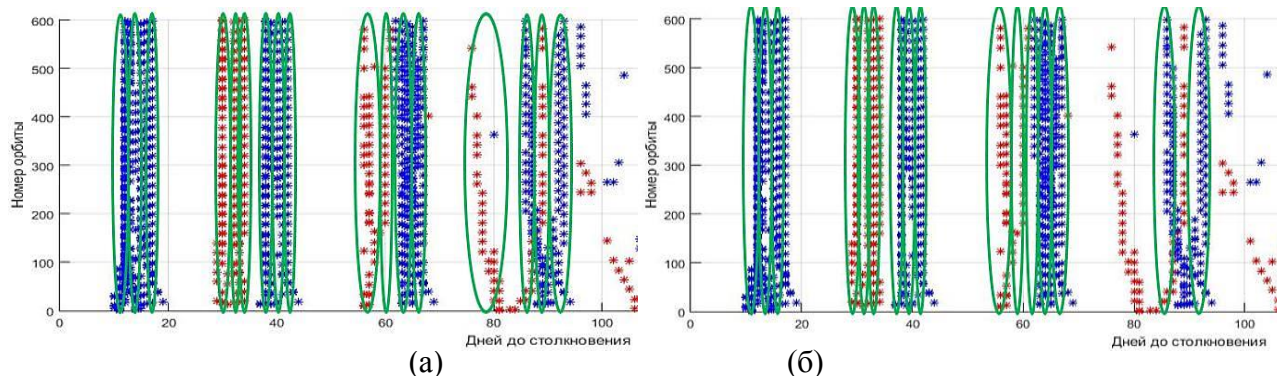


Рис. 9. Распределение по времени сеансов регистрации орбитальным телескопом $D_{in} = 2$ м (а) и $D_{in} = 3$ м (б) астероидов классов Атона и Аполлона, идущих к Земле от перигелия своей орбиты, на интервале 100 суток до столкновения.

Результаты моделирования показали целесообразность использования на КА телескопов с апертурами порядка 2-х метров и более, полями зрения не менее 3-х градусов для обнаружения АСЗ за 35 суток до прогнозируемого столкновения с Землёй.

Результаты имитационного моделирования функционирования ОИП с телескопами видимого диапазона длин волн подтвердили её возможности по обеспечению благоприятных условий наблюдения АСЗ классов АААА. В итоге установлено, что предложенный вариант построения орбитальной информационной подсистемы принципиально способен обеспечить обнаружение 50 метровых астероидов с 5% альбедо за 35 суток до прогнозируемого столкновения с Землёй.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ.

1. Сформулирована общая постановка задачи информационного обеспечения астероидной безопасности Земли. Создание ОИП позволяет существенно повысить достоверность и надёжность обнаружения опасных астероидов.

2. В рамках решения поставленной в диссертации задачи:

- разработаны исходные данные и на их базе определены основные требования к ОИП;
- обоснованы предложения по определению критериев выбора и рациональной баллистической структуры ОИП группировки КА с телескопами видимого диапазона, обеспечивающей благоприятные

условия наблюдения, а также рациональные варианты баллистического построения ОИП КА с ИК – телескопами для определения физико – химических свойств астероидов на основе предложенной приближённой спектрально – энергетической модели астероида;

- получены оценки допустимых дальностей обнаружения астероидов, движущихся по столкновительным траекториям с Землёй;
- выработаны оценки возможностей использования орбит, проходящих в окрестности точек либрации L_2 системы «Солнце – Земля», для организации синхронно – базисных наблюдений астероидов одновременно с нескольких КА для повышения точности прогнозирования их орбит;
- разработана имитационная модель, позволяющая оценить и подтвердить основные характеристики функционирования ОИП для её предварительного полученного облика;
- создан комплекс программно – алгоритмического обеспечения, на основе которого обоснованы исходные данные для разработки системы информационно – баллистического обеспечения и получены качественные и количественные результаты проектно – баллистического анализа ОИП.

3. В результате выполненных исследований получены следующие основные результаты:

- обоснована целесообразность использования в составе ОИП:
 - телескопов видимого диапазона длин волн для обнаружения астероидов в ходе постоянного непрерывного сканирования небесной сферы и прогноза параметров их движения;
 - телескопов ИК диапазона длин волн для оценки физико – химических характеристик астероидов;
- определены ограничения на типы и параметры орбит КА рассматриваемой ОИП для минимизации времен засветки телескопов Солнцем;
- показано, что для принятого равного 35 суткам времени от обнаружения АСЗ до момента его возможного достижения поверхности Земли, требуемая дальность обнаружения АСЗ классов АААА соответствует 0.8 – 1 а.е. от точки возможного столкновения с Землёй;
- установлено, что для обеспечения требуемой точности определения параметров орбит АСЗ рационально использование синхронно – базисных наблюдений одновременно с нескольких КА с использованием для этих целей гелиоцентрической орбиты Земли и либрационной точки L_2 системы «Солнце – Земля»;
- выбраны и обоснованы критерии определения рациональных удалений КА от Земли на её гелиоцентрической орбите, с помощью которых показано, что:
 - для двух патрулирующих КА с телескопами видимого диапазона с проникающей силой 27-28 звёздных величин целесообразно

расположить их впереди Земли на её орбите по ходу движения на расстояниях 0.3 а.е. и 0.85 а.е.;

– в случае одного патрулирующего КА – на удалении 0.6 а.е.;

- проведено численное моделирование вариантов баллистического построения КА с ИК телескопами, при этом показано:
 - для наблюдения малых АСЗ, находящихся внутри орбиты Земли и имеющих температуру поверхности более 235K, целесообразно разместить КА с ИК телескопом 6-13 мкм в окрестности точки либрации L_2 системы «Солнце – Венера», однако технически это труднореализуемо в настоящее время;
 - для наблюдения малых АСЗ с температурой поверхности 137K - 158K, находящихся на расстояниях более 1 а.е. от Солнца, целесообразно использовать ИК диапазон 6-18 мкм и разместить КА в окрестности точки либрации L_2 системы «Солнце – Земля» ;
 - в перспективе возможно совместное использование точек либрации L_2 систем «Солнце – Земля» и «Солнце – Венера» ;
- результаты имитационного моделирования функционирования орбитальной информационной подсистемы с телескопами видимого диапазона длин волн подтвердили её возможности по обеспечению благоприятных условий обнаружения и наблюдения АСЗ классов АААА; показано, что предложенный вариант орбитальной группировки способен обеспечить обнаружение 50 метровых в поперечнике астероидов с альбедо 5% за 35 суток до прогнозируемого столкновения с Землёй.

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации:

1. Райкунов К.Г., Емельянов В.А., Меркушев Ю.К. Метод сравнительной оценки потоков излучения, приходящих от астероида на входной зрачок космического телескопа в видимом и ИК диапазонах // Космонавтика и Ракетостроение. 2012. Выпуск №3(68). С. 79-84. (0.52 п. л./0.25 п. л.)
2. Райкунов К.Г., Емельянов В.А. Результаты оценки минимального размера астероида, обнаруживаемого космическими телескопами ИК и видимого диапазонов // Космонавтика и Ракетостроение. 2013. Выпуск №2(71). С. 52-61. (0.9 п.л./0.5 п.л.)
3. Райкунов К.Г. Оценка требований к аппаратуре видимого и ИК диапазонов наблюдения, предназначенной для обнаружения астероидов и размещаемой в точке либрации L_2 системы Солнце-Земля // Космонавтика и Ракетостроение. 2013. Выпуск №3(72). С. 185-194. (0.9 п.л.)
4. Райкунов К.Г., Емельянов В.А. Способ определения температуры, степени черноты и размера астероида космическим телескопом ИК - диапазона // Космонавтика и Ракетостроение. 2013. Выпуск №4(73). С. 154-162. (0.8 п. л./0.4 п. л.)
5. Райкунов К.Г., Лысенко Л.Н. Рациональная структура спутниковой группировки орбитального сегмента информационной системы астероидной безопасности Земли // Общероссийский научно-технический журнал Полет. 2014. Выпуск №1. С. 37-44. (1 п.л./0.5 п.л.)

6. Райкунов К.Г. Метод выбора рациональной баллистической структуры орбитального сегмента информационной системы обеспечения астероидной безопасности Земли с целью обеспечения наилучших условий наблюдения. // Космонавтика и Ракетостроение. 2014. Выпуск №1(74). С. 216-228. (1.15 п.л.)

7. Райкунов К.Г. Анализ перспектив использования орбитального сегмента системы информационного обеспечения астероидной безопасности Земли // Материалы XXXVIII Академических чтений по Космонавтике, посвящённых памяти С.П. Королёва. Москва. 2014. С. 400-401. (0.06 п. л.)

8. Райкунов К.Г. Возможность организации базисно-синхронных наблюдений, предназначенных для обнаружения потенциально опасных астероидов // Материалы XXXVIII Академических чтений по Космонавтике, посвящённых памяти С.П. Королёва. Москва. 2015. С. 304 (0.06 п. л.)

9. Емельянов В.А., Ёлкин К.С., Бодрова Ю.С., Меркушев Ю.К., Райкунов К.Г. Проект «Космический барьер» оперативного обнаружения малых астероидов на столкновительных с Землёй траекториях, не обнаруживаемых наземными телескопами // Тезисы докладов IX международной конференции «Околоземная астрономия», Терскол. 2015. С. 74. (0.03 п. л./0.006 п. л.)

Подписано к печати . Заказ № .

Объем 1,0 печ.л. Тираж 100 экз.

Типография МГТУ им. Баумана

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д.5, стр. 1

8 (499) 263-62-01