

На правах рукописи

106af -

Бодрова Юлия Сергеевна

**МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ КОСМИЧЕСКОЙ
СИСТЕМЫ ОБНАРУЖЕНИЯ МАЛЫХ ОПАСНЫХ НЕБЕСНЫХ ТЕЛ**

Специальность 05.13.01

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

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Королёв - 2017

Работа выполнена в Федеральном государственном унитарном предприятии «Центральный научно-исследовательский институт машиностроения»

Научный руководитель: **Емельянов Владимир Алексеевич** – доктор технических наук, профессор, начальник сектора ФГУП ЦНИИмаш.

Официальные оппоненты: **Олейников Игорь Игоревич** – доктор технических наук, начальник научно-технического комплекса АО «Научно-производственная корпорация «Системы прецизионного приборостроения» (г. Москва)

Коломыцев Иван Вячеславович – кандидат технических наук, начальник лаборатории ОАО «Корпорация космических систем специального назначения «Комета» (г. Москва)

Ведущая организация: Институт космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН) (г. Москва)

Защита диссертации состоится «14» сентября 2017 года в 14:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.125.12 в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» по адресу: 125993, Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д.4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» по адресу: 125993, Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д.4.

https://www.mai.ru/events/defence/index.php?ELEMENT_ID=80754

Автореферат разослан «___» _____ 2017 г.

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

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 212.125.12, к.т.н.



А.В. Старков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Проблема Астероидно-кометной опасности (АКО) состоит в возможности столкновения малых небесных тел (астероидов, комет) с Землёй. Результат такого столкновения зависит от размеров опасного небесного тела (ОНТ). Наиболее актуальной является проблема обнаружения малых ОНТ. Это связано с тем, что с уменьшением размеров астероидов резко возрастает их количество, средняя частота падения на Землю и сложность обнаружения.

Важнейшей задачей является обнаружение опасных космических объектов на подлётной к Земле траектории. Реализация возможности заблаговременного обнаружения наземными телескопами объектов, движущихся по столкновительным траекториям, требует организации патрулирования всего неба большим числом телескопов. Но при этом принципиально не удастся обнаружить тела, которые движутся со стороны Солнца (при углах элонгации менее $\sim 60^\circ$). В полной мере реализация этой возможности допустима лишь с привлечением специальных космических средств наблюдения. Использование телескопов космического базирования, в особенности расположенных на большом расстоянии от Земли, позволит обнаруживать тела, обладающие малой, видимой с Земли, угловой скоростью и приближающиеся со стороны Солнца. В настоящее время не существует специализированной космической системы (КС), предназначенной для решения задачи обнаружения и наблюдения угрожающих Земле астероидов.

Несмотря на достигнутые в последние десятилетия значительные успехи в области обнаружения ранее неизвестных малых небесных тел (НТ) Солнечной системы (СС), существующие наземные средства наблюдения и отдельные космические аппараты (такие как WISE, NEOSat) не могут решить задачу информационного обеспечения защиты Земли от АКО в полном объёме. В подтверждение этому можно указать на ряд случаев, когда опасные астероиды были обнаружены и идентифицированы лишь после того, как проходили на достаточно близких расстояниях от Земли. В случае движения этих тел по столкновительным траекториям удар оказался бы неожиданным. Это обуславливает необходимость создания специализированной КС, способной обеспечить предупреждение об опасном сближении или столкновении заранее. Варианты и принципы построения такой системы могут быть различными. Для выбора наиболее рационального из возможных вариантов необходима оценка их целевой эффективности. Для этого необходимо формирование показателей эффективности и разработка методов её оценки. Они составляют основу системных проектно-поисковых исследований в обеспечении создания космических средств оперативного предупреждения о падении на Землю малых ОНТ. В работе предлагается методика оценки целевой эффективности КС обнаружения малых ОНТ и проводится её апробация на примере оценки целевой эффективности функционирования одного из вариантов такой специализированной системы – КС «Барьер» оперативного обнаружения малых ОНТ. Несмотря на высокую научную значимость известных работ в исследуемом направлении ни в одной из них не ставилась и не решалась задача

разработки методики, позволяющей проводить сравнительный анализ целевой эффективности различных вариантов построения КС обнаружения малых ОНТ на широком множестве орбит угрожающих Земле астероидов.

Следует отметить, что получаемые с помощью предлагаемой методики результаты на начальном этапе исследований не позволяют принять окончательное решение по рациональному облику КС, так как в конечном итоге он должен будет удовлетворять требованиям, касающимся не только целевой, но и экономической эффективности КС. Однако рассмотрение ограничений по стоимости создания и разработки КС, массе выводимой полезной нагрузки, возможностям удержания КА на выбранных орбитах и т.д. не может проводиться без учёта получаемых на данном этапе результатов. Таким образом, проводимая оценка целевой эффективности различных вариантов размещения КТ и определение области их рационального применения является ключевым этапом при решении задачи выбора рационального облика КС, предназначенной для обнаружения малых НТ Солнечной системы.

Объектом исследования является КС оперативного обнаружения и наблюдения малых ОНТ, включающая 2 космических телескопа (КТ) видимого диапазона, функционирующих на орбите обращения Земли вокруг Солнца.

Предметом исследования является целевая эффективность функционирования космической системы обнаружения малых ОНТ, движущихся по столкновительным с Землёй орбитам.

Целью работы является разработка методики оценки целевой эффективности космической системы при решении задачи обнаружения малых ОНТ, идущих по столкновительным с Землёй траекториям, позволяющей проводить сравнительный анализ различных вариантов построения КС и выбор с её использованием рационального варианта баллистического построения КС типа «Барьер» оперативного обнаружения малых ОНТ.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

- определить требуемую область рационального применения космических средств обнаружения малых ОНТ;
- выбрать показатели и сформировать критерий целевой эффективности функционирования исследуемой КС;
- разработать имитационную модель функционирования исследуемой КС;
- разработать алгоритм формирования исходных данных для имитационной модели функционирования КС;
- сформировать исходные данные и провести моделирование;
- провести анализ полученных результатов на предмет влияния параметров баллистического построения и аппаратуры наблюдения на целевую эффективность КС типа «Барьер»;
- определить области рационального применения различных вариантов баллистического построения КС на широком множестве возможных столкновительных траекторий малых ОНТ;
- провести выбор рационального варианта построения КС на базе разработанной модели оценки эффективности.

Методы исследования

Основными используемыми в работе методами являются системный анализ, методы механики космического полета, методы математического моделирования, методы теории принятия решений.

Научная новизна:

- определена требуемая область рационального применения космических средств обнаружения и наблюдения ОНТ, включающая орбиты астероидов, недоступных для наблюдения с помощью наземных телескопов;
- разработана методика оценки показателей целевой эффективности КС обнаружения малых ОНТ, позволяющая проводить сравнительный анализ целевой эффективности различных вариантов её построения на широком множестве орбит угрожающих Земле астероидов;
- разработано программно-алгоритмическое обеспечение имитационного моделирования, с помощью которого определены области рационального применения различных вариантов построения КС типа «Барьер» на широком множестве возможных столкновительных траекторий малых ОНТ;
- обоснован выбор рациональных вариантов баллистического построения КС типа «Барьер» применительно к обнаружению угрожающих Земле астероидов, в том числе движущихся по траекториям, принадлежащим множеству орбит, недоступных для наблюдения с Земли.

Практическая значимость результатов исследования заключается в том, что разработанная методика может быть использована при проведении проектно-поисковых исследований в обеспечение создания специализированной КС обнаружения малых ОНТ.

Достоверность результатов, полученных в работе, подтверждается соответствием получаемых в результате моделирования результатов ожидаемым при изменении исходных данных; полученными физически обоснованными закономерностями; использованием современных методов моделирования и обработки данных; совпадением отдельных полученных в работе результатов моделирования с данными других авторов.

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. Автор является соавтором патента на изобретение №2597028.

Апробация работы

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

- Семинар молодых учёных и специалистов: Научные чтения им. Уткина в ФГУП ЦНИИмаш (Королев, 2013г.)
- IX Международная конференция «Околоземная астрономия» (Терскол, 2015 г.)

- ХLI Академические чтения по космонавтике, посвященные памяти академика С.П. Королёва в МГТУ им. Н.Э. Баумана (Москва, 2017 г.)

Результаты исследований автора опубликованы в 4 статьях в изданиях, входящих в перечень ВАК Минобрнауки России, в 2 статьях сборника трудов конференции и 2 сборниках тезисов докладов.

Положения, выносимые на защиту:

1. Результаты определения области рационального применения космических телескопов, включающей множество орбит астероидов, недоступных для наблюдения с Земли;
2. Методика оценки показателей целевой эффективности КС типа «Барьер» при решении задачи обнаружения малых ОНТ, идущих по столкновительным с Землёй траекториям;
3. Программно-алгоритмический комплекс и полученные на его основе качественные и количественные результаты определения областей рационального применения различных вариантов баллистического построения космической системы на широком множестве возможных столкновительных траекторий малых ОНТ;
4. Рациональные варианты баллистического построения КС типа «Барьер» из двух КТ на орбите обращения Земли вокруг Солнца.

Личный вклад автора: Все результаты, представленные в работе, получены автором лично. Вклад автора состоит в формулировке задач исследования, разработке методики, алгоритмов и программного обеспечения для их реализации, обработке, анализе, обобщении полученных результатов и формулировке выводов.

Структура и объём работы:

Диссертация состоит из введения, трёх глав, заключения и приложения. Работа содержит 149 страниц, 40 иллюстраций, 25 таблиц. Список используемой литературы включает 47 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дано обоснование актуальности темы диссертационной работы, сформулированы цели, задачи, объект и предмет исследования, представлены сведения научной новизне, практической значимости, апробации результатов исследования, а также основные положения, выносимые на защиту.

Первая глава включает анализ проблемы обеспечения оперативного предупреждения об АКО. В частности, рассмотрены основные характеристики и статистические распределения параметров орбит известных астероидов СС, в том числе астероидов, сближающихся с Землёй и потенциально опасных астероидов. Сделан вывод о том, что для решения задачи предупреждения об АКО в полном объеме необходимо обеспечение беспропусчного обнаружения ОНТ, движущихся по любым возможным столкновительным траекториям, включая орбиты с высокими наклонениями. При этом область рационального применения космических средств наблюдения ОНТ должна быть сформирована с учётом возможностей существующих наземных средств наблюдения.

Проведен обзор существующих и перспективных средств обнаружения и наблюдения за малыми небесными телами как наземного, так и космического базирования. Обзор показал, что специализированной системы космического базирования, способной обеспечить заблаговременное предупреждение о столкновении с опасными астероидами, в настоящее время нет.

Приведены основные ТТХ, рассмотрен состав, структура и типовой сценарий функционирования исследуемой в качестве прототипа КС «Барьер» оперативного обнаружения малых ОНТ (рисунок 1), необходимые для построения имитационной модели, позволяющей проводить оценку обеспечиваемых КС параметров обнаружения ОНТ. Система включает 2 КТ на орбите обращения Земли вокруг Солнца, функционирующих в режиме обзорно-поискового наблюдения. Их оптические оси непрерывно вращаются вокруг заданного направления ($T_1 - T_2$) и ориентированы к нему под постоянным углом α . Основными принципами построения КС «Барьер» являются:

- формирование с помощью вращающихся узких полей зрения КТ замкнутой барьерной зоны регистрации ОНТ (выделена голубым цветом на рисунке 1);
- расположение КТ на большом расстоянии от Земли для обеспечения обнаружения тел, приближающихся со стороны Солнца;
- возможность проведения синхронно-базисных позиционных измерений положения ОНТ на малых дугах;
- использование ПЗС-матриц в режиме временной задержки и накопления заряда.

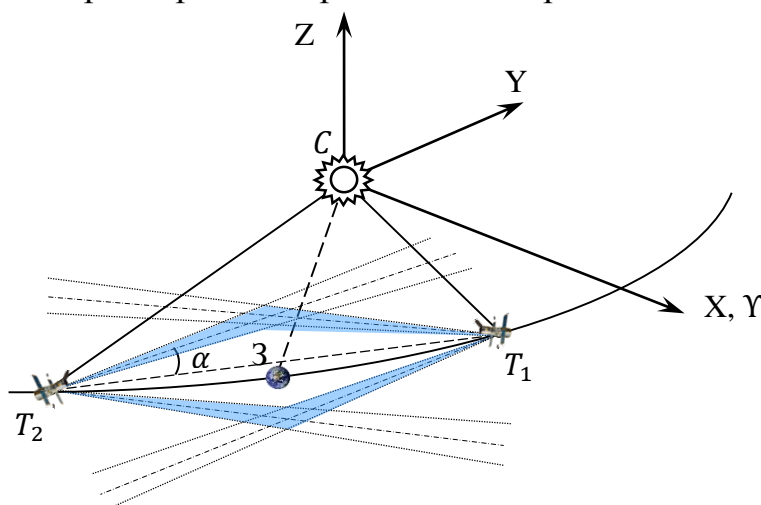


Рисунок 1 – Схема взаимного расположения Земли и телескопов КС «Барьер» оперативного обнаружения малых ОНТ в эклиптической системе координат $SXYZ$ при вращении оптических осей вокруг направления $T_1 - T_2$

Приведена постановка задачи оценки целевой эффективности КС обнаружения малых ОНТ: При заданных параметрах баллистического построения и аппаратуры наблюдения КС оперативного обнаружения малых ОНТ необходимо получить характеристики сеансов наблюдения опасных астероидов космическими телескопами для оценки показателей целевой эффективности исследуемого варианта построения специализированной КС при решении задачи оперативного обнаружения угрожающих Земле ОНТ. Проведен анализ существующих исследований по рассматриваемой тематике.

Вторая глава посвящена описанию разработанной методики оценки целевой эффективности КС обнаружения малых ОНТ и составляющих её основу алгоритмов.

Определена требуемая область рационального применения космических средств обнаружения малых ОНТ, включающая орбиты астероидов, недоступных для наблюдения с помощью наземных телескопов вследствие ограничения по допустимому углу солнечной элонгации. Проведено имитационное моделирование движения астероидов по 17100 столкновительным орбитам с афелийными расстояниями в пределах $Q = \{1,1 \div 6\}$ а.е.; перигелийными расстояниями в пределах $q = \{0,1 \div 0,9\}$ а.е.; наклонениями орбит $i = \{0^\circ \div 180^\circ\}$; значениями долготы восходящего узла орбит астероидов $\Omega = \{0^\circ; 180^\circ\}$ в течение ~5 лет до момента столкновения ОНТ с Землёй. В результате моделирования более 8 тысяч орбит были классифицированы как неблагоприятные для наблюдения с помощью наземных телескопов, своевременное обнаружение движущихся по ним астероидов с Земли затруднено или невозможно. На 69 из рассмотренных орбит астероиды оказались недоступны для наблюдения с Земли более чем за год до момента столкновения. Астероиды на всех орбитах, классифицированных в работе в качестве недоступных для наблюдения наземными телескопами, при приближении к Земле подходят к ней со стороны Солнца. Наименее благоприятными для наблюдения с Земли являются астероиды, которые движутся при этом по вытянутым орбитам прямого движения, а также астероиды, орбиты которых в основном лежат внутри орбиты Земли и выходят за её границы лишь в окрестности своих афелиев. Требуемая область применимости КС обнаружения малых ОНТ должна, в первую очередь, включать орбиты указанного типа.

В качестве основных показателей целевой эффективности функционирования КС обнаружения малых ОНТ выбраны:

- минимальный размер обнаруживаемого ОНТ d ;
- обеспечиваемое время заблаговременного предупреждения о столкновении ОНТ с Землёй t_y .

В работе предложен следующий критерий целевой эффективности функционирования КС обнаружения малых ОНТ, позволяющий проводить сравнительный анализ альтернативных вариантов её построения: минимизировать среднее значение m_d минимальных доступных для обнаружения диаметров ОНТ, обеспечиваемых КС на множестве моделируемых орбит, при обеспечении требуемого времени предупреждения t_y :

$$\begin{cases} m_d \rightarrow \min \\ t_y \geq t_{\text{требуемое}} \end{cases} \quad (1)$$

где $m_d = \frac{\sum_1^J d_j}{J}$, $j = \overline{1, J}$, где J – число моделируемых орбит астероидов.

При сравнении вариантов построения КС, обеспечивающих близкие значения m_d , предлагается отдать предпочтение варианту, обеспечивающему

минимальное значение среднеквадратичного отклонения $\sigma_d = \sqrt{\frac{\sum_1^J (d_q - m_d)^2}{J-1}}$.

При этом учитывалось, что использование усреднённых значений ведёт к потере части информации. В частности некоторые орбиты ОНТ могут оказаться недоступными для наблюдения тем или иным телескопом, что не учитывается при использовании параметров m_d и σ_d . Однако этот недостаток обусловлен необходимостью оценить эффективность функционирования КС применительно к обнаружению ОНТ на широком множестве моделируемых орбит. Для смягчения указанного недостатка предлагается при принятии решения о выборе рационального варианта построения КС использовать дополнительную информацию, в частности оценить эффективность функционирования КС применительно к различным группам орбит ОНТ, а также оценить относительное количество контролируемых орбит ОНТ из числа моделируемых применительно к различным размерам обнаруживаемых астероидов и значениям обеспечиваемого времени предупреждения об их столкновении с Землёй:

$$\frac{\sum_1^J b_j}{J} \rightarrow \max, \quad b_j = \begin{cases} 0, & \text{если ОНТ, движущееся по } j - \text{ой орбите, не обнаружено} \\ 1, & \text{если ОНТ, движущееся по } j - \text{ой орбите, обнаружено} \end{cases}$$

где b_j – параметр, характеризующий обнаружение ОНТ на j -ой орбите.

Для оценки показателей целевой эффективности функционирования системы КТ разработана имитационная модель процесса захвата ОНТ полями зрения КТ, позволяющая получать характеристики сеансов наблюдения астероидов на множестве моделируемых орбит. Моделирование проводится с использованием переменного шага, определяемого из условия обеспечения времени пребывания изображения астероида в пикселе ПЗС-матрицы, и отражает следующие процессы:

- невозмущенное движение астероидов по столкновительным с Землёй траекториям с заданными орбитальными параметрами;
- невозмущенное движение Земли, телескопов и их вращаемых по заданному закону перенацеливания полей зрения;
- изменение условий наблюдения ОНТ (дальность, фазовый угол) во времени с определением видимого блеска ОНТ;
- определение времени нахождения точечного изображения ОНТ в пикселе ПЗС-матрицы с оценкой реализуемой проникающей способности, необходимой для вычисления минимального размера обнаруживаемого ОНТ.

Обсуждаемая методика включает алгоритмы моделирования указанных процессов, включая операторы перенацеливания и оценки реализуемых значений блеска ОНТ и проникающей силы КТ с выбранными оптическими характеристиками.

Для оценки времени t_y заблаговременного предупреждения о падении ОНТ на Землю проведено моделирование движения астероидов, движущихся по столкновительным с Землёй траекториям. В силу того, что в момент столкновения с астероидом Земля может с равной вероятностью находиться в любой точке своей орбиты, за точку встречи принята точка пересечения орбиты Земли с осью X эклиптической системы координат (ЭСК). Зная положение астероида на момент встречи с Землёй, задав афелийное Q и перигелийное q расстояния его орбиты,

можно вычислить остальные параметры орбиты ОНТ, а также его положение на момент начала моделирования t_0 . Момент встречи астероида с Землёй t_{ct} отсчитывается от момента начала моделирования t_0 , и отличается от него на заданное время моделирования t_m , которое принималось равным одному году.

Положение ОНТ в текущий момент времени $t \in [t_0, t_{ct}]$ определяется с помощью уравнения Кеплера. Далее с помощью известных преобразований через элементы орбиты астероида находим его координаты в ЭСК. Положения Земли и КТ в текущий момент времени определяются через аргумент широты на момент начала моделирования и угловую скорость вращения тела по орбите, которая равна угловой скорости вращения Земли вокруг Солнца. При этом учитывается значение временной задержки, с которой излучение от астероида достигает телескопа, возникающей ввиду существенных расстояний между КТ и наблюдаемым астероидом, а также конечной скорости распространения света.

Для получения изображения ОНТ на ПЗС-матрице необходимо получить его координаты в приборной системе координат (СК), связанной с ПЗС-матрицей телескопа. Для этого проводится ряд последовательных преобразований координат ОНТ. В частности для телескопа T_1 , размещаемого впереди Земли, проводятся следующие преобразования. Для того, чтобы представить координаты ОНТ в системе координат, связанной с телескопом T_1 (ССК₁) используются известные соотношения для направляющих косинусов, используемые для перехода от ЭСК к орбитальной СК. Для преобразования координат ОНТ из ССК₁ в СК, связанную с оптической осью КТ (СКСОО₁) выполняются последовательные повороты осей ССК₁ $O_1X_{T_1}Y_{T_1}Z_{T_1}$ на углы $\varphi_1, \gamma_\Gamma(t), \gamma_B$, определяющие положение СКСОО₁ относительно ССК₁ в текущий момент времени t (рисунок 2, где С – Солнце; З – Земля; T_1, T_2 – телескопы; пунктиром отмечена орбита Земли; $SXYZ$ – ЭСК; $O_1X_{T_1}Y_{T_1}Z_{T_1}$ – ССК₁; $O_1X_{oo1}Y_{oo1}Z_{oo1}$ – СКСОО₁; штрихами отмечены получаемые в результате поворотов на заданные углы промежуточные положения осей координат; θ_1 – угол при Солнце между направлениями на Землю и на телескоп T_1 ; θ_2 – угол при Солнце между направлениями на Землю и на телескоп T_2 ; α – угол наклона оптической оси телескопа к направлению $T_1 - T_2$). Результирующая матрица перехода от ССК₁ к СКСОО₁:

$$\begin{pmatrix} X_{oo1} \\ Y_{oo1} \\ Z_{oo1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \gamma_\Gamma & \sin \gamma_\Gamma \sin \varphi_1 \\ \sin \gamma_B \sin \gamma_\Gamma & \cos \gamma_B \cos \varphi_1 - \sin \gamma_B \cos \gamma_\Gamma \sin \varphi_1 \\ \cos \gamma_B \sin \gamma_\Gamma & -\sin \gamma_B \cos \varphi_1 - \cos \gamma_B \cos \gamma_\Gamma \sin \varphi_1 \\ & -\sin \gamma_\Gamma \cos \varphi_1 \\ & \cos \gamma_B \sin \varphi_1 + \sin \gamma_B \cos \gamma_\Gamma \cos \varphi_1 \\ & -\sin \gamma_B \sin \varphi_1 + \cos \gamma_B \cos \gamma_\Gamma \cos \varphi_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_{T_1} \\ Y_{T_1} \\ Z_{T_1} \end{pmatrix}. \quad (2)$$

Чтобы получить координаты ОНТ в плоскости ПЗС-матрицы телескопа осуществляется переход от СКСОО₁ к СК, связанной с ПЗС-матрицей КТ:

$$X_{A_{M1}} = -f \frac{X_{oo1}}{Z_{oo1}}, \quad Y_{A_{M1}} = -f \frac{Y_{oo1}}{Z_{oo1}}. \quad (3)$$

Аналогичные преобразования проводятся для КТ T_2 , размещаемого позади Земли, и в случае если оптические оси КТ вращаются вокруг направлений КТ-Земля.

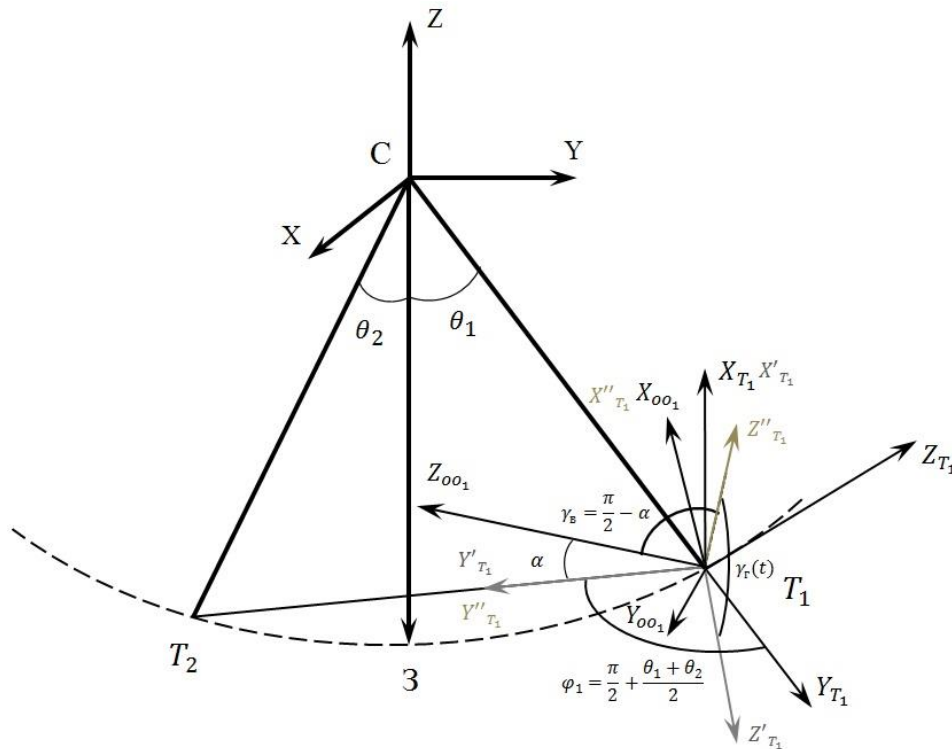


Рисунок 2 – Схема последовательного перехода от ССК₁ к СКСОО₁

Условия захвата астероида полем зрения телескопа эквивалентны условиям пребывания изображения астероида на ПЗС-матрице:

$$\left| \frac{X_{AM1}}{a_{\text{п}}} \right| \leq N_x, \quad \left| \frac{Y_{AM1}}{a_{\text{п}}} \right| \leq N_y, \quad (4)$$

где $2N_y$ – число накопительных столбцов матрицы, $2N_x$ – число пикселей в накопительном столбце, $a_{\text{п}}$ – линейный размер пиксела ПЗС-матрицы.

Констатация факта обнаружения астероида происходит при выполнении условий захвата ОНТ полем зрения КТ (4) и превышения при реализуемых условиях наблюдения проникающей силой КТ видимой звёздной величины (блеска) астероида. Исходя из второго указанного условия, рассчитывается минимальный диаметр астероида, который сможет обнаружить данный КТ при реализуемых условиях наблюдения, т.е. дальности от телескопа до астероида L , фазовом угле φ и времени накопления полезного сигнала $t_{\text{н}}$:

$$d = rL \sqrt[4]{\frac{k^2 \Delta^2}{\rho^2 S \eta t_{\text{н}}}} 10^{[1.7 - 0.1\mu + 0.2f(\varphi)]} \quad (5)$$

где r – расстояние от астероида до Солнца; ρ – отражательная способность поверхности ОНТ (альбедо); S – эффективная площадь телескопа в см²; η – квантовая эффективность ПЗС-матрицы; k – отношение сигнала к шуму; Δ – поперечник изображения наблюдаемого объекта в угловых секундах (сторона квадрата из целого числа пикселей, покрываемых изображением объекта на матрице); μ – фон неба в звёздных величинах на квадратную секунду дуги.

При моделировании астероидов, заведомо идущих по столкновительным траекториям, момент столкновения с Землёй задан и заранее известен, поэтому время $t_{\text{в}}$ с момента обнаружения астероида до столкновения определяется автоматически в процессе моделирования и зависит от параметров орбиты ОНТ. Время предупреждения о столкновении ОНТ с Землёй $t_{\text{п}}$ определяется как:

$$t_y = t_B - t_{00}, \quad (6)$$

где t_{00} – время, требуемое для определения орбиты обнаруженного ОНТ.

Разработанная модель позволяет оценить показатели целевой эффективности КС применительно к обнаружению ОНТ, движущихся к Земле по типовым эллиптическим орбитам, а также оценить характеристики и количество сеансов наблюдения любого НТ с известными на заданную эпоху параметрами орбиты.

В третьей главе проведена оценка целевой эффективности функционирования КС типа «Барьер» с использованием предложенной во второй главе методики. Проведено имитационное моделирование процесса захвата полями зрения КТ опасных небесных тел на эллиптических орбитах с изменяемыми в широких пределах параметрами в течение 1 года до момента столкновения с Землёй. Все моделируемые орбиты ОНТ можно разделить на четыре группы: астероид приближается к Земле от афелия своей орбиты прямого (ПДА) или обратного движения (ОДА); астероид приближается к Земле со стороны Солнца, т.е. от перигелия своей орбиты прямого (ПДП) или обратного движения (ОДП).

Проведен анализ полученных результатов моделирования на предмет влияния параметров баллистического построения и аппаратуры наблюдения на целевую эффективность КС типа «Барьер». Варьируемыми параметрами баллистического построения являлись: расстояние от Земли до КТ l_T , угол наклона оптической оси к некоторому фиксированному направлению (КТ-КТ или КТ-Земля) α , а также период обращения оптической оси КТ вокруг выбранного направления вращения $T_{ск}$. Указанные параметры оказывают существенное влияние на такие параметры обнаружения как дальность наблюдения ОНТ L , фазовый угол φ , время накопления полезного сигнала t_H . Что в свою очередь влияет как на обеспечиваемое системой время предупреждения t_y , так и на минимальный доступный для обнаружения размер ОНТ d . Рассмотрены 48 вариантов размещения КТ на орбите обращения Земли вокруг Солнца. Расчёты проведены для 16 вариантов орбит транснептуновых ($Q = 40$ а. е.) и околоземных ($Q = 1.1$ а. е.) астероидов. Получены следующие основные закономерности:

- Увеличение угла наклона оптической оси КТ к заданному направлению вращения при наблюдении астероидов на орбитах:
 - а) ПДА и ОДА приводит к уменьшению фазового угла наблюдения, что способствует уменьшению минимального доступного для обнаружения размера ОНТ;
 - б) ПДП и ОДП приводит к увеличению фазового угла, что способствует увеличению минимального доступного для обнаружения размера ОНТ.
- Увеличение угла наклона оптической оси в большинстве случаев приводит к увеличению дальности наблюдения НТ, что приводит к увеличению времени предупреждения, однако размер обнаруживаемого тела также может увеличиться.
- Увеличение расстояния от Земли до КТ, как правило, приводит к увеличению как размера обнаруживаемого ОНТ, так и времени предупреждения. Однако при достаточном удалении КТ от Земли возможно уменьшение фазового угла наблюдения астероида, что приведет к уменьшению d при сохранении или увеличении времени предупреждения.

- Изменение периода обращения мгновенного поля зрения вокруг заданного направления может привести как к увеличению минимального размера объекта наблюдаемого космическим телескопом, так и к его пропуску. Выбор периода обращения призван обеспечить с одной стороны отсутствие пропуска ОНТ в результате слишком медленной скорости вращения поля зрения, а с другой стороны достаточное для накопления полезного сигнала время нахождения изображения ОНТ в пикселях ПЗС-матрицы за счёт не слишком быстрого её перемещения. Поэтому значение этого параметра следует выбирать отдельно для каждого варианта построения КТ.

Изменение параметров аппаратуры наблюдения в первую очередь оказывает влияние на такой показатель эффективности КС как минимальный диаметр обнаруживаемого ОНТ. Такие параметры как диаметр входного зрачка объектива телескопа $D_{вх}$, коэффициент пропускания оптики $\tau_{оп}$, квантовая эффективность ПЗС-матрицы η , отношение сигнала к шуму k входят в формулу (5) для оценки минимального диаметра обнаруживаемого телескопом ОНТ при заданных условиях наблюдения. Такие параметры как линейный размер пиксела $a_{п}$ и размер ПЗС-матрицы оказывают существенное влияние на обеспечиваемую КТ точность единичных угловых измерений положений наблюдаемого ОНТ и на время пребывания его изображения в пикселе ПЗС-матрицы. Все указанные параметры аппаратуры наблюдения учитываются при расчётах, проводимых в рамках разработанной методики. При моделировании использовались значения параметров, предлагаемые авторами рассматриваемой концепции КС «Барьер».

Кроме того, для нескольких вариантов размещения КТ проведено имитационное моделирование захвата ОНТ, движущихся по 432 орбитам: с афелиями вблизи границ Главного пояса астероидов, т.е. орбит Марса ($Q = 1.6$ а. е.) и Юпитера ($Q = 6$ а. е.), орбитам астероидов, принадлежащих к транснептуновым объектам, с афелиями вблизи орбиты Плутона ($Q = 40$ а. е.), а также орбитам околоземных астероидов с афелийными расстояниями близкими к радиусу орбиты Земли ($Q = 1.1$ а. е.). Перигелийные расстояния моделируемых орбит составляли $q = \{0.1; 0.1; 0.9\}$ а.е.; наклоны орбит $i = \{0^\circ; 30^\circ; 60^\circ; 120^\circ; 150^\circ; 180^\circ\}$; значения долготы восходящего узла $\Omega = \{0^\circ; 180^\circ\}$. Анализ результатов моделирования показал, что использование системы из двух КТ на орбите обращения Земли вокруг Солнца позволяет получить существенно меньшие значения диаметров обнаруживаемых ОНТ по сравнению с использованием одного КТ (рисунок 3) за счёт того, что телескопы, располагаемые в различных точках гелиоцентрической орбиты Земли, имеют различные области рационального применения. Под областью рационального применения того или иного варианта построения КТ понимается множество орбит ОНТ, для которых исследуемый вариант обеспечивает наилучшие характеристики обнаружения по сравнению с другими рассматриваемыми. На рисунке 3 в качестве примера представлены диаграммы распределения минимальных диаметров d ОНТ, обнаруживаемых на моделируемых орбитах телескопами T_3 и T_4 при их независимом (а, б) и совместном (в) функционировании, в зависимости от времени t_6 с момента обнаружения до столкновения ОНТ с Землёй. Телескопы T_3 и T_4 расположены на расстояниях 1 а.е.

впереди и позади Земли соответственно, оптические оси вращаются вокруг направления КТ–Земля под углом $\alpha=27^\circ$ с периодом $T_{\text{СК}}=12$ ч.

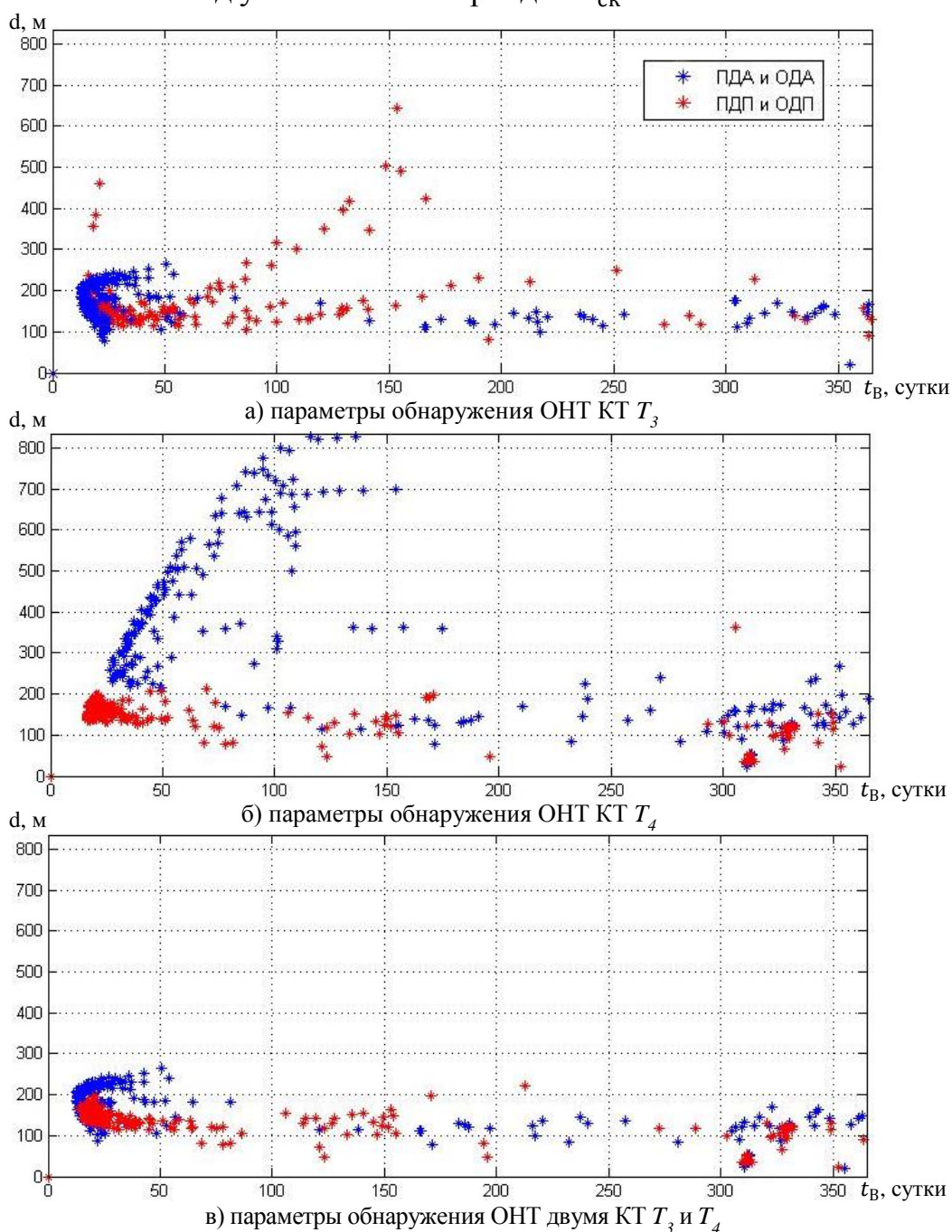


Рисунок 3 – Распределение минимальных диаметров d тел, обнаруживаемых двумя КТ на расстоянии 1 а.е. впереди (T_3) и позади (T_4) Земли на 432 моделируемых типовых орбитах в зависимости от времени t_b с момента обнаружения до столкновения НТ с Землёй при их независимом и совместном функционировании

Определены области рационального применения КТ T_3 и T_4 , а также КТ T_1 и T_2 , расположенных на расстояниях 0.3 а.е. впереди и 0.15 а.е. позади Земли соответственно, оптические оси вращаются вокруг направления $T_1 - T_2$ под углом $\alpha=35^\circ$ с периодом $T_{\text{СК}}=5$ ч. Для этого был проведен подробный анализ полученных результатов имитационного моделирования их функционирования, в результате которого получены следующие основные закономерности, характеризующие области их рационального применения:

- Телескопы T_1 и T_3 , располагаемые впереди Земли, обнаруживают астероиды меньших диаметров на орбитах ОДА и ОДП;
- Телескопы T_2 и T_4 , располагаемые позади Земли, обнаруживают астероиды меньших диаметров на орбитах ПДА и ПДП;
- Телескопами T_3 и T_4 обеспечиваются большие значения времени t_6 по сравнению с T_1 и T_2 для всех рассмотренных орбит ОНТ;
- Минимальные значения диаметров большинства обнаруживаемых ОНТ, движущихся по орбитам ПДА и ОДА, обеспечиваются при наблюдении телескопами T_1 и T_2 ;
- Минимальные значения диаметров астероидов, движущихся по орбитам ПДП с $q \geq 0.5$ а. е. и орбитам ПДА, были получены при наблюдении КТ T_2 ;
- Минимальные значения диаметров ОНТ, движущихся по орбитам ОДП с $q \geq 0.5$ а. е. и орбитам ОДА, были получены при наблюдении с помощью КТ T_1 ;
- Минимальные значения диаметров ОНТ, движущихся по орбитам ПДП и ОДП с $q \lesssim 0.5$ а. е. обеспечиваются в основном при наблюдении КТ T_3 и T_4 ;
- На орбитах с афелийным расстоянием $Q = 1.1$ а. е., близким к радиусу орбиты Земли, ОНТ минимального диаметра в основном обнаруживаются с помощью телескопа T_1 .

Эти данные в основном соответствуют захватам астероидов при их прохождении через барьерную зону, образуемую полями зрения КТ.

С помощью разработанного автором программно-алгоритмического комплекса на основании предложенного критерия проведен сравнительный анализ целевой эффективности различных вариантов баллистического построения КС типа «Барьер», состоящей из двух КТ на орбите обращения Земли вокруг Солнца, и выбраны наиболее рациональные из них применительно к нескольким вариантам заданных ограничений на обеспечиваемое время предупреждения о столкновении обнаруженного ОНТ с Землёй: $t_y \geq 1, 7$ и 30 суток. В общем случае задача может быть решена для любого требуемого времени t_y . Параметры исследуемых вариантов баллистического построения КТ приведены в таблице 1, где l_T – расстояние между Землей и КТ, α – угол наклона оптической оси КТ к заданному направлению вращения, $T_{ск}$ – период обращения мгновенного поля зрения вокруг этого направления.

Таблица 1 – Параметры исследуемых вариантов построения КТ

Условное обозначение варианта КТ	Расположение телескопа	l_T , а.е.	α , °	$T_{ск}$, ч.	Направление вращения
T_1	Впереди Земли	0.3	35	5	$T_1 - T_2$
T_2	Позади Земли	0.15	35	5	
T_3	Впереди Земли	1	27	12	КТ-Земля
T_4	Позади Земли	1	27	12	КТ-Земля
T_5	Впереди Земли	0.3	35	5	КТ-Земля
T_6	Позади Земли	0.3	35	5	КТ-Земля
T_7	Впереди Земли	0.5	42	12	КТ-Земля
T_8	Позади Земли	0.5	42	12	КТ-Земля
T_9	Впереди Земли	0.3	6	8	$T_9 - T_{10}$
T_{10}	Позади Земли	0.3	6	8	

На основании полученных результатов имитационного моделирования проведена оценка относительного числа обнаруженных космическими телескопами ОНТ в зависимости от размера d этих ОНТ для различных значений времени t_y (рисунок 4). Для каждой пары КТ оценено интегральное значение относительного количества обнаруженных на моделируемых орбитах ОНТ, характеризуемое площадью под соответствующим данному варианту построения КС графиком на рисунке 4. Кроме того, вычислены средние значения m_d и среднеквадратичные отклонения σ_d минимальных диаметров обнаруживаемых космическими телескопами ОНТ для нескольких вариантов ограничения по времени t_y (таблица 2).

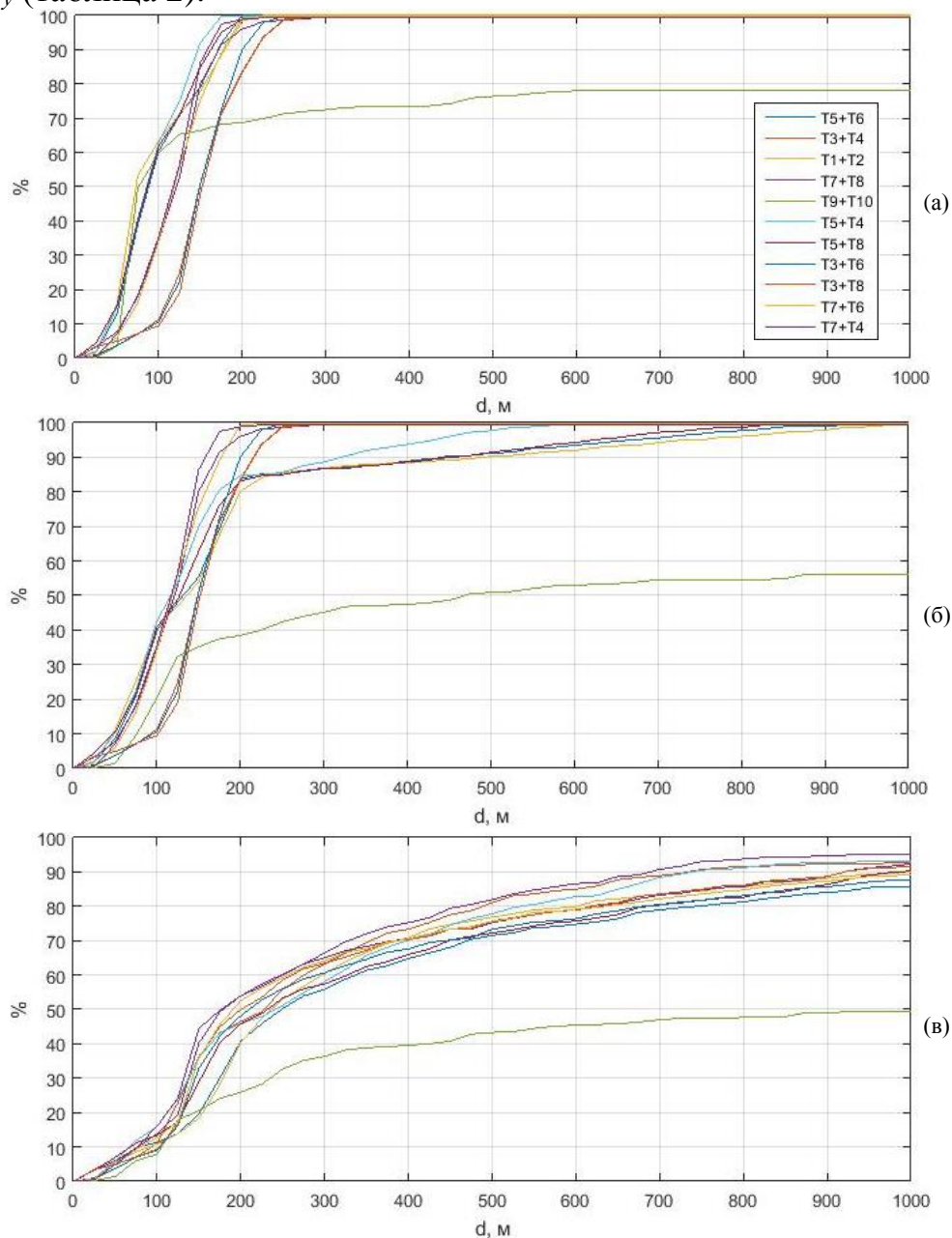


Рисунок 4 – Относительное количество обнаруженных космическими телескопами ОНТ за время t_y более 1(а), 7(б) и 30(в) суток до столкновения с Землёй в зависимости от размера ОНТ

Расчёты проведены для нескольких множеств столкновительных орбит ОНТ:

- астероиды, приближающиеся к Земле с любых возможных направлений

(рисунок 4, таблица 2);

- астероиды, приближающиеся к Земле со стороны Солнца;
- астероиды, движущиеся по орбитам, принадлежащим требуемой области рационального применения космических средств наблюдения, определенной с учётом возможностей наземных телескопов.

Таблица 2 – Средние значения m_d и среднеквадратичные отклонения σ_d минимальных диаметров ОНТ, обнаруживаемых КТ, при $t_y \geq 1, 7$ и 30 суток до момента столкновения астероида с Землёй

Ограничение по t_y	$t_y \geq 1$ суток				$t_y \geq 7$ суток				$t_y \geq 30$ суток			
	m_d		σ_d		m_d		σ_d		m_d		σ_d	
T_1	108	95	57	51	380	192	619	206	730	320	860	274
T_2	212		206		236		205		448		407	
T_3	174	150	58	47	174	150	58	47	497	277	610	221
T_4	242		183		242		183		360		330	
T_5	102	98	50	46	343	183	568	186	736	359	868	318
T_6	277		258		277		258		481		430	
T_7	139	117	69	46	139	117	69	46	556	328	680	319
T_8	311		282		311		283		421		362	
T_9	219	109	417	109	380	203	491	193	400	253	493	207
T_{10}	115		109		260		302		405		355	
T_5+T_4	91		39		146		113		302		260	
T_5+T_8	95		47		173		172		360		326	
T_3+T_6	147		42		147		42		332		301	
T_3+T_8	152		48		152		48		316		282	
T_7+T_6	118		42		118		42		329		321	
T_7+T_4	112		38		112		38		276		254	

На основании полученных результатов даны рекомендации по выбору рациональных вариантов размещения КТ при решении задачи обнаружения ОНТ, принадлежащих каждому из рассмотренных множеств:

- 1) для обнаружения ОНТ, движущихся к точке встречи с Землёй с любых возможных направлений:
 - а) при ограничении на время предупреждения $t_y \geq 1$ суток или отсутствии ограничения рациональным является выбор варианта T_5+T_4 ;
 - б) при $t_y \geq 7$ суток рациональным является выбор варианта T_7+T_4 ;
 - в) при $t_y \geq 30$ суток рациональным является выбор варианта T_7+T_4 ;
- 2) для обнаружения ОНТ, приближающихся к Земле со стороны Солнца, а также движущихся по орбитам, принадлежащим требуемой области рационального применения космических средств наблюдения, определенной с учётом возможностей наземных телескопов:
 - а) при ограничении на время предупреждения $t_y \geq 1$ суток или отсутствии ограничения рациональным является выбор варианта T_9+T_{10} ;
 - б) при $t_y \geq 7$ суток рациональным является выбор варианта T_5+T_4 ;
 - в) при $t_y \geq 30$ суток рациональным является выбор варианта T_7+T_4 ;

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Определена требуемая область рационального применения космических средств обнаружения малых ОНТ, включающая множество орбит астероидов, недоступных для наблюдения с помощью наземных телескопов. Показано, что к наименее благоприятным для наблюдения с помощью наземных телескопов в основном относятся астероиды, подходящие к Земле со стороны Солнца, которые движутся при этом по вытянутым орбитам прямого движения, а также астероиды, орбиты которых в основном лежат внутри орбиты Земли и могут выходить за её границы лишь в окрестности своих афелиев.
2. Разработана методика оценки показателей целевой эффективности КС типа «Барьер» при решении задачи обнаружения малых ОНТ, движущихся по столкновительным с Землёй траекториям. Выбраны и обоснованы основные показатели целевой эффективности функционирования КС обнаружения малых ОНТ и предложен вариант критерия эффективности, позволяющего проводить сравнительный анализ различных вариантов построения КС на множестве моделируемых орбит ОНТ.
3. Разработан и реализован в среде Matlab программно-алгоритмический комплекс, позволяющий на основе предложенной методики проводить оценку и сравнительный анализ целевой эффективности различных вариантов построения системы КТ обнаружения ОНТ. Приведены и описаны метод и алгоритмы, положенные в основу имитационного моделирования функционирования КС оперативного обнаружения малых ОНТ, в частности процесса захвата ОНТ полями зрения КТ. С помощью разработанной имитационной модели проведена оценка эффективности функционирования рассматриваемой КС «Барьер» оперативного обнаружения малых ОНТ. Проведен анализ полученных результатов моделирования и дана оценка влияния параметров баллистического построения и аппаратуры наблюдения КС на показатели целевой эффективности её функционирования: минимальные доступные для обнаружения диаметры ОНТ и времена предупреждения об их столкновении с Землёй. Определены области рационального применения для 4 вариантов размещения КТ на гелиоцентрической орбите Земли на широком множестве возможных столкновительных траекторий малых ОНТ.
4. На базе разработанной методики оценки целевой эффективности даны рекомендации по выбору рациональных вариантов баллистического построения КС типа «Барьер» из двух КТ на орбите обращения Земли вокруг Солнца применительно к обнаружению астероидов, приближающихся к Земле с любых возможных направлений, астероидов, приближающихся к Земле со стороны Солнца, а также астероидов, неблагоприятных для наблюдения с помощью наземных телескопов, то есть движущихся по орбитам, принадлежащим требуемой области рационального применения космических средств наблюдения ОНТ. Для каждого из множеств рассмотрены три значения ограничения на требуемое время предупреждения о столкновении ОНТ с Землёй: $t_y \geq 1, 7$ и 30 суток.

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации

Публикации в изданиях Перечня ВАК РФ

1. Бодрова Ю.С. «Перспективы повышения эффективности космической системы «Барьер» оперативного предупреждения о падении на Землю малых астероидов» // «Космонавтика и ракетостроение», 2013. № 2(71). – с. 62-66.
2. Бодрова Ю.С. «Влияние орбитального построения системы космических телескопов на показатели эффективности её функционирования при обнаружении астероида типа Атон на подлётной к Земле траектории» // «Космонавтика и ракетостроение», 2014. № 3(76). – с. 66-72.
3. Бодрова Ю.С. «Методика определения времени пребывания астероидов на подлётных траекториях различного типа вне зоны видимости наземных телескопов» // «Полет», 2014. №11. - с. 23-28.
4. Емельянов В.А., Савельев М.И., Ёлкин К.С., Бодрова Ю.С., Меркушев Ю.К., Рамалданов Р.П. «Принципы построения и показатели целевой эффективности системы оперативного предупреждения об астероидно-кометной опасности «Космический барьер» // Технологии гражданской безопасности, 2016. том 13, №1(47). - с. 44-49.
5. Патент №2597028. РФ. МПК G01C 21/02. Способ обзора космического пространства между Солнцем и Землёй, недоступного для наблюдения оптическими средствами, находящимися на Земле и на околоземных орбитах, из-за их засветки Солнцем, с космического аппарата, размещённого на орбите Земли на постоянном расстоянии от Земли / ОАО "Корпорация космических систем специального назначения "Комета", Бодрова Ю.С., Ёлкин К.С., Емельянов В.А., Захаров А.И., Кулешов Ю.П., Мисник В.П., Носатенко П.Я., Полуян А.П., Прохоров М.Е., Рыхлова Л.В., Шустов Б.М., Яковенко Ю.П. – опубл. 10.09.2016, Бюл. №25.

Другие публикации

1. Дедус Ф.Ф., 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» // «Околоземная астрономия 2015». Труды международной конференции. 31 августа – 5 сентября 2015г. п. Терскол – М.: Янус-К, 2015 – с. 188-194.
2. Емельянов В.А., Бодрова Ю.С., Меркушев Ю.К., Рамалданов Р.П. «Предварительные результаты сравнительного анализа целевой эффективности различных вариантов космических телескопов оперативного предупреждения о падении на Землю малых астероидов» // «Околоземная астрономия 2015». Труды международной конференции. 31 августа – 5 сентября 2015г. п. Терскол – М.: Янус-К, 2015 – с. 195-200.
3. Бодрова Ю.С., Райкунов К.Г. «Подходы к выбору рациональных вариантов баллистического построения космических телескопов для оперативного обнаружения и определения физико-химических свойств астероидов, неблагоприятных для наблюдения с Земли» // Сборник тезисов «XLI Академические чтения по космонавтике, посвященные памяти академика С.П. Королёва» – Москва: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2017 с. 312.