

На правах рукописи



Бурдин Иван Анатольевич

МЕТОДИКА ПОСТРОЕНИЯ ВЫСОКОТОЧНОЙ СОГЛАСУЮЩЕЙ МОДЕЛИ  
РАДИАЦИОННОГО ДАВЛЕНИЯ НАВИГАЦИОННЫХ КОСМИЧЕСКИХ  
АППАРАТОВ СИСТЕМЫ ГЛОНАСС

Специальность

05.07.09 «Динамика, баллистика, управление движением летательных  
аппаратов»

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва 2019

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)».

Научный руководитель: доктор технических наук, старший научный сотрудник, заместитель генерального директора, заместитель генерального конструктора Акционерного общества «Научно-производственная корпорация «Системы прецизионного приборостроения», по совместительству профессор кафедры «Информационно-управляющие комплексы» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»  
**Пасынков Владимир Викторович.**

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, главный научный сотрудник Федерального государственного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук»  
**Боровин Геннадий Константинович.**

доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник Государственного астрономического института имени П.К. Штернберга Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова  
**Чазов Вадим Викторович.**

Ведущая организация: **Акционерное общество «Государственный космический научно-производственный центр имени М.В. Хруничева»**

Защита диссертации состоится «14» ноября 2019 года в «16» 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, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д. 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» и на сайте МАИ по ссылке: [https://mai.ru/events/defence/index.php?ELEMENT\\_ID=104893/](https://mai.ru/events/defence/index.php?ELEMENT_ID=104893/).

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2019 года.

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,  
кандидат технических наук

Старков А.В.

## 1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** В 2011 году завершены мероприятия Федеральной целевой программы «Глобальная навигационная система» на период 2002-2011 гг. Цели программы в основном достигнуты – обеспечено существенное повышение точности услуг, предоставляемых потребителям глобальной навигационной спутниковой системы (ГЛОНАСС). Системные характеристики ГЛОНАСС доведены до паритетного уровня с характеристиками зарубежного аналога – Global Positioning System (GPS). Федеральной целевой программой «Поддержание, развитие и использование системы ГЛОНАСС на 2012-2020 годы» предусмотрено не только поддержание достигнутого уровня системы по количественному составу, основным индикатором и показателям ее эффективности, но и дальнейшее планомерное, в том числе и упреждающее развитие ее потребительских свойств: точности, доступности и оперативности навигационных услуг. Ключевые точностные характеристики системы ГЛОНАСС (погрешность определения местоположения в реальном времени в государственной геоцентрической системе координат и погрешность определения времени потребителя) заданы в составе индикаторов и показателей в виде зависимости от точности космического сегмента – погрешности бортовых эфемерид и частотно-временных поправок. Следовательно, требования к точности расчета и прогнозирования эфемеридно-временной информации (ЭВИ), сформулированные в составе общих требований к наземному сегменту космического комплекса (НС КК) системы ГЛОНАСС, естественным образом декомпозируются на требования к точности расчета и прогнозирования эфемерид навигационного космического аппарата (НКА), а также требования к точности расчета частотно-временных поправок и прогнозирования расхождения бортовых шкал времени (БШВ) НКА и шкалы времени космического комплекса (КК) системы ГЛОНАСС. Исследования в данной работе посвящены способам повышения точности эфемеридной информации (ЭИ) навигационных сообщений космического сегмента ГЛОНАСС.

Со времени запуска первого НКА системы ГЛОНАСС и до текущего момента требования к точности ЭИ навигационных сообщений космического сегмента постоянно повышались. На этапе создания и развития системы (1980 г. – 2000 г.) требования определялись соответствующими программами достижения и обеспечения точности. В период 2002 г. – 2011 г. можно зафиксировать следующий этап ужесточения требований к ЭИ в соответствии с федеральной целевой программой «Глобальная навигационная система» на период 2002-2011 гг. Исходя из приведенных требований, проводились работы по модернизации и развитию эфемеридного обеспечения системы ГЛОНАСС. Начиная с 2012 г. можно отметить начало очередного этапа повышения требований к точности прогнозирования ЭИ НКА ГЛОНАСС, которые определяются Федеральной целевой программой «Поддержание, развитие и использование системы ГЛОНАСС на 2012-2020 годы». Данный факт влечет за собой необходимость дальнейшего совершенствования методов и моделей эфемеридного обеспечения системы ГЛОНАСС. Для решения проблемы повышения точности прогнозирования эфемерид необходимо понять, какой вклад в общую погрешность моделирования параметров орбиты вносит каждое из возмущений, учитываемых в модели движения (МД) НКА ГЛОНАСС. Естественные силы, действующие на НКА, представляют собой консервативные (гравитационные) и неконсервативные, к которым относятся радиационные возмущения. Радиационное давление на поверхность НКА – давление вследствие прямого излучения Солнца, отраженной и инфракрасной радиации Земли, собственного теплового излучения НКА. На современном этапе развития

навигационной системы ГЛОНАСС основным источником погрешностей при прогнозировании эфемерид является моделирование именно радиационных возмущений.

Решению задачи по совершенствованию моделирования сил радиационного давления посвящены исследования отечественных авторов Бартенева В.А., Гаязова И.С., Глотова В.Д., Гречкосеева А.К., Коробкина В.А., Куропятникова А.Д., Марарескул Т.А., Митрикаса В.В., Панюшина А.Н., Хомяка Р.В. и др. Также, совершенствование моделей учета радиационных возмущений проводилось и зарубежными исследователями: Fliegel H.F., Gallini T.E., Swift E.R., Kubo-oka T., Sengoku A., Bar-Sever Y.E., Da Kuang, Springer T.A., Beutler G., Rothacher M., Marquis W., Krier C., Ziebart M., Adhya S., Sibthorpe A., Edwards S., Cross P., Rodriguez-Solano C.J., Hugentobler U., Steigenberger P., Lutz S. и др.

Основные подходы по учету радиационных возмущений, действующих на НКА ГЛОНАСС – построение априорных и согласующих моделей. Априорная модель радиационного давления (МРД) – физическая модель, которая использует исходные данные об объекте: информацию о форме, геометрических размерах объекта, данные о радиационных характеристиках поверхности НКА, алгоритм работы системы ориентации и стабилизации (СОС) НКА. Все априорные модели имеют предел точности, обусловленный индивидуальными особенностями работы аппаратуры НКА и невозможностью предсказания изменения характеристик его поверхности в процессе активного существования на орбите. В связи с этим применяется подход согласования параметров априорной модели по измерительной информации. Данные согласуемые параметры модели используются при прогнозировании параметров движения НКА. Также, используя выборки согласуемых параметров, можно сформировать новый тип модели – согласующую. Согласующая МРД – формальная модель остаточных немоделируемых ускорений (НМУ), параметры которой определяются по результатам наблюдений (эмпирически). Характерной особенностью данной модели является учет индивидуальных особенностей каждого НКА, которые проявляются в процессе активного существования на орбите.

Исходя из этого, совершенствование согласующей МРД является перспективным направлением исследований для повышения точности эфемеридного обеспечения ГЛОНАСС.

В связи с вышесказанным, актуальность работы обусловлена следующими основными моментами:

- современными требованиями к точности прогнозирования эфемеридной информации НКА ГЛОНАСС;
- преобладающим влиянием погрешностей моделирования сил светового давления на точность прогнозирования ЭИ НКА ГЛОНАСС.

**Целью работы** является повышение точности прогнозирования эфемеридной информации НКА ГЛОНАСС.

Для достижения поставленной цели необходимо решить **научную задачу** – разработку методики построения высокоточной согласующей модели радиационного давления НКА ГЛОНАСС.

**Объект исследований** – навигационный космический аппарат и радиационное давление на его поверхность.

**Предметом исследований** являются методы, методики и модели учета радиационных возмущений орбитального движения НКА.

**Методы исследований.** В процессе выполнения работы были использованы методы: динамики полета, небесной механики, математического анализа, математической статистики и обработки данных.

### **Основные направления проведения исследований:**

- анализ возмущений орбитального движения НКА;
- анализ действующих требований к эфемеридному обеспечению ГЛОНАСС;
- анализ методов и методик учета радиационного давления в модели движения НКА и постановка научной задачи;
- построение высокоточной согласующей МРД НКА ГЛОНАСС;
- уточнение параметров высокоточной согласующей МРД;
- экспериментальная отработка высокоточной согласующей МРД НКА;
- разработка предложений по использованию высокоточной согласующей МРД НКА в эфемеридном обеспечении (ЭО) ГЛОНАСС.

**Основные результаты**, полученные в ходе проведения исследований, имеющие научную и практическую значимость и выносимые на защиту:

- высокоточная согласующая МРД НКА ГЛОНАСС;
- методика определения параметров высокоточной согласующей МРД НКА ГЛОНАСС.

**Научная новизна** полученных в диссертационной работе результатов заключается в следующем:

- разработана новая высокоточная согласующая МРД для всех типов НКА ГЛОНАСС, отличающаяся от известных аналогов структурой и настраиваемая в зависимости от условий освещенности орбиты НКА;
- разработана методика определения параметров высокоточной согласующей МРД НКА ГЛОНАСС, состоящая из двух этапов и позволяющая уточнить коэффициенты модели, отвечающие за влияние короткопериодических и долгопериодических возмущений;
- получены параметры высокоточной согласующей МРД по экспериментальным данным.

**Обоснованность научных результатов** проведенных диссертационных исследований подтверждается: непротиворечивостью полученных в ходе диссертационного исследования результатов в части известных; обстоятельным и достаточно полным анализом предшествующих научных разработок по исследуемой автором задаче; преемственностью основных научных положений по отношению к базовым концепциям и фундаментальным результатам в смежных областях науки и техники; достаточной апробацией материалов диссертации в опубликованных работах, в том числе в докладах на научно-технических конференциях.

**Степень достоверности научных результатов** проведенных диссертационных исследований подтверждается:

- соответствием расчетных соотношений и полученных результатов в процессе проведения математических и физических экспериментов;
- полнотой проведенных экспериментальных исследований, позволивших получить статистически достоверные оценки;
- полученным эффектом от применения разработанной модели и методики при определении и прогнозирования параметров движения космического аппарата (КА).

**Научная значимость** работы состоит в развитии методов учета влияния радиационного давления на движение НКА.

**Практическая значимость** полученных в работе результатов состоит в том, что разработанные модель, методика и предложения по использованию позволяют повысить точность прогнозирования эфемерид НКА ГЛОНАСС.

Содержание исследований и полученные результаты соответствуют п. 1 и 2 паспорта специальности 05.07.09 «Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов».

**Апробация работы.** Результаты работы докладывались и были одобрены на научно-технических конференциях различного уровня: Седьмая научно-техническая конференция молодых ученых и специалистов центра управления полетами, посвященная памяти В.И. Лобачева (г. Королев, 2017), Седьмая всероссийская конференция «Фундаментальное и прикладное координатно-временное и навигационное обеспечение» (КВНО-2017) (г. Санкт-Петербург, 2017), Двадцать первая международная научная конференция «Системный анализ, управление и навигация» (г. Евпатория, 2017).

**Публикации.** Основные положения диссертационной работы опубликованы в 8 научных работах (в 6 статьях, в том числе 4 рецензируемых статьях, техническом проекте и сборнике тезисов докладов).

**Внедрение результатов диссертационной работы.** Полученные результаты были использованы в процессе выполнения государственной опытно-конструкторской работы (ОКР) «Сантиметр» в рамках Федеральной целевой программой «Поддержание, развитие и использование системы ГЛОНАСС на 2012-2020 годы», что подтверждается материалами технического проекта.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы из 58 наименований и одного приложения. Текст диссертации изложен на 144 страницах (включая приложение), включает 116 рисунков и 30 таблиц.

## 2. СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** приводится краткий обзор известных результатов в данной предметной области, обосновывается актуальность решаемой задачи, дается общая характеристика работы.

В **первой главе** проведен анализ возмущений орбит НКА и факторов, определяющих погрешности их моделирования. Показано, что одним из основных источников ошибок при прогнозировании эфемерид НКА ГЛОНАСС на текущий момент остается погрешность учета сил радиационного давления. Основными причинами этого являются НМУ центра масс НКА, возникающие за счет погрешностей ориентации панелей солнечных батарей (ПСБ) на Солнце и особенностей конструкции НКА ГЛОНАСС, работы его бортовых систем и изменением оптических характеристик поверхности за время активного существования НКА на орбите. Проведена экспериментальная оценка точности прогноза эфемерид НКА ГЛОНАСС, которая показала, что для выполнения требований к ЭИ НКА ГЛОНАСС, предъявленных в Федеральной целевой программе «Поддержание, развитие и использование системы ГЛОНАСС на 2012-2020 годы» (составляющая эквивалентной погрешности измерений псевдодальности за счет погрешности (предельной по уровню вероятности 0,67) бортовой эфемеридно-временной информации должна составлять 0,3 метра к 2020 году), необходим поиск и реализация мероприятий по снижению погрешностей прогнозирования эфемерид НКА ГЛОНАСС. Это может быть достигнуто путем компенсации немоделируемых ускорений, возникающих вследствие сил негравитационной природы. Следовательно, для достижения заданных точностных характеристик (ТХ) ЭИ НКА ГЛОНАСС требуется совершенствование существующей МРД и возникает актуальная задача – определение и высокоточный учет в модели движения возмущающих ускорений, вызванных радиационным давлением на корпус НКА ГЛОНАСС.

Проведен анализ методов учета радиационных возмущений, применяемых в ЭО ГЛОНАСС. Приведены основные подходы по компенсации влияния солнечной радиации

на НКА – построение априорной и согласующей МРД. Исторически первая модель радиационного давления была одномерная, т.е. описывала ускорение только вдоль оси Солнце – КА. Поскольку давление солнечной радиации обратно пропорционально квадрату расстояния до Солнца (как и солнечное гравитационное притяжение), то ускорение, вызванное солнечным давлением, выражается в долях солнечного притяжения через коэффициент светового давления  $\kappa$ :

$$\vec{g}_{\text{рад}} = -\kappa \mu_{\square} \frac{\vec{r}_{\square}}{r_{\square}^3}, \quad (1)$$

где  $\mu_{\square}$ ,  $\vec{r}_{\square}$  – гравитационный параметр Солнца и вектор КА – Солнце.

Навигационный КА ГЛОНАСС любой модификации представляет собой тело сложной невыпуклой формы (рисунок 1), значительных геометрических размеров (панели солнечных батарей), с активной СОС, а также собственным тепловым излучением вследствие работы бортовых систем, регулируемым системой терморегулирования (СТР). Ориентация НКА ГЛОНАСС строится по двум направлениям: на Землю и на Солнце. Реализация ориентации осуществляется с помощью специальных датчиков – прибора ориентации на Солнце (ПОС) и прибора ориентации на Землю (ПОЗ). На рисунке 1 представлена ориентация осей номинальной панельной связанной с объектом системы координат (НПССК), которая используется для расчета ускорения от радиационного давления. Основное направление – Солнце – Объект (ось  $Ox_1$ ), ось  $Ox_2$  перпендикулярна плоскости Солнце – Объект – Земля (СОЗ) вдоль оси привода панелей солнечных батарей, ось  $Ox_3$  дополняет систему до правой. Как и в случае с простейшей одномерной моделью (1), вводятся безразмерные коэффициенты светового давления  $\kappa_1$ ,  $\kappa_2$ ,  $\kappa_3$  для каждой составляющей возмущения. Проекция ускорения на оси НПССК НКА ГЛОНАСС от радиационного давления при этом выражаются в виде:

$$g_{\text{рад}}^i = \kappa_i \frac{\mu_{\square}}{r_{\square}^2}, \quad i = 1, 2, 3, \quad (2)$$

где  $\mu_{\square}$  – гравитационный параметр Солнца;

$r_{\square}$  – расстояние от НКА до Солнца;

$\kappa_i$  – коэффициент светового давления в соответствующем направлении НПССК.

Первая модель радиационного давления НКА модификации «Глонасс» (МСД-1) была одномерной. В модели радиационного давления МСД-1 космический аппарат был представлен в виде двух элементарных поверхностей: панель солнечных батарей и цилиндрический корпус. Для компенсации остаточных немоделируемых ускорений использовалось согласование коэффициентов светового давления по измерениям, согласовывалась поправка к возмущению по оси Солнце – объект ( $\kappa_1$ ).

Вторая модель радиационного давления НКА модификации «Глонасс» (МСД-2) была двухмерной (плоской), то есть описывала радиационное возмущение по двум составляющим: по

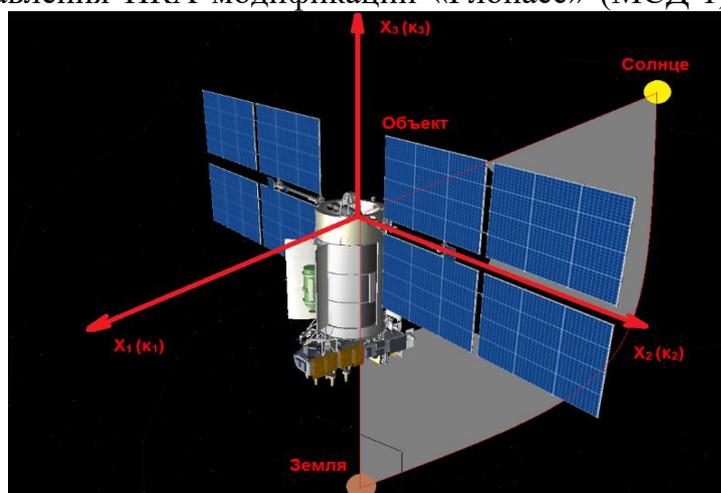


Рисунок 1 – Модель НКА «Глонасс-М» и НПССК

направлению солнечного излучения (ось  $Ox_1$ ) и перпендикулярно ему в плоскости СОЗ (ось  $Ox_3$ ). Из-за того, что ориентация и форма НКА модификации «Глонасс» была симметрична относительно плоскости СОЗ, предпосылка для возникновения третьей составляющей (нормальной к плоскости СОЗ – ось  $Ox_2$ ) отсутствовала. В модели радиационного давления МСД-2 космический аппарат был также представлен в виде двух элементарных поверхностей: панель солнечных батарей и цилиндрический корпус. При этом количество согласуемых параметров МРД оставалось прежним – поправка к возмущению по оси Солнце–объект ( $\kappa_1$ ).

В дальнейшем был применен комплексный метод решения проблемы снижения уровня немоделируемых ускорений. Разработанная в результате модель получила название МРД-3. Впоследствии МРД-3 была дополнена учетом влияния отраженного от Земли излучения и теплового излучения Земли. Основные аспекты разработанной в период 1990 ... 1992 гг. МРД-3 НКА модификации «Глонасс»:

- учитываются три составляющих ускорения от радиационного давления вдоль осей НПССК: Солнце – объект ( $\kappa_1$ ), нормаль к плоскости СОЗ ( $\kappa_2$ ), направление, которое вместе с перечисленными направлениями дополняет систему координат до «правой» ( $\kappa_3$ ). Указанные составляющие ускорения от радиационного давления нормированы значением ускорения от гравитационного притяжения Солнца и учитываются при помощи безразмерных коэффициентов светового давления  $\kappa_1$ ,  $\kappa_2$ ,  $\kappa_3$ ;

- значения коэффициентов  $\kappa_1$ ,  $\kappa_2$ ,  $\kappa_3$  получены путем статистического имитационного моделирования. Для этого создана математическая модель НКА (модификация «Глонасс»), которая рассматривает объект состоящим из более чем 200 элементарных поверхностей (плоскость, конус, цилиндр). Учитываются эффекты взаимного затенения и переотражения радиации до 3-го порядка частями поверхности НКА ввиду его существенно невыпуклой формы, работа СОС (в номинальном режиме) и СТР (угол открытия створок жалюзи);

- коэффициенты затабулированы в виде таблиц зависимостей от угла СОЗ, а сами таблицы используются для численного учета возмущений от давления прямой солнечной радиации при расчете правых частей систем дифференциальных уравнений движения;

- для компенсации остаточных НМУ используется два согласуемых параметра (по направлению Солнце – объект ( $\kappa_1$ ), по нормали к направлению Солнце – объект в плоскости СОЗ ( $\kappa_3$ )).

Основными особенностями НКА модификации «Глонасс-М» по сравнению с модификацией «Глонасс» (в части моделирования светового давления) были следующие:

- увеличенная на 40% площадь ПСБ;
- использование программной ориентации ПСБ на Солнце в канале привода ПСБ;
- модернизированная система терморегулирования НКА, которая позволила снизить асимметрию собственного теплового излучения НКА.

В результате дальнейших исследований был установлен факт, что учет в конструкции НКА элементов, чья площадь не превышает 2%...3% общей площади НКА, нецелесообразно. Более того, эта цифра может быть увеличена в 2...3 раза в том случае, если элемент не выступает за площадь миделевого сечения. Иными словами, учет более 200 поверхностей в МРД-3 был избыточным. Поэтому при создании априорной МРД «Глонасс-М» был ограничен состав учитываемых поверхностей – ПСБ, цилиндр корпуса, блок антенно-фидерного устройства (АФУ), жалюзи СТР. Для компенсации остаточных НМУ использовались три согласуемых параметра (по направлению Солнце – объект ( $\kappa_1$ ), по

нормали к плоскости СОЗ ( $\kappa_2$ ), по нормали к направлению Солнце – объект в плоскости СОЗ ( $\kappa_3$ )).

Характеристики моделей радиационного давления, разработанных для эфемеридного обеспечения ГЛОНАСС, приведены в таблице 1.

По результатам анализа данных таблицы 1 установлено, что первоначально развитие априорных МРД шло в сторону увеличения количества учитываемых поверхностей НКА и уточнения их оптических характеристик. Это позволило достигнуть относительной погрешности примерно в 1%, что стало пределом. Дальнейшее совершенствование априорной модели уже не приводило к снижению НМУ.

Таблица 1 – Основные характеристики моделей радиационного давления ЭО ГЛОНАСС

Условное название	Год создания	Размерность, количество поверхностей априорной модели	Уровень НМУ	Кол-во согласуемых параметров модели
МСД-1	1982	одномерная, 2	10%	1
МСД-2	1985	двумерная, 2	5%	1
МРД-3	1992	трехмерная, 200	1%	2
МРД «Глонасс-М»	2002	трехмерная, 13	1%	3

Для обеспечения требуемой на тот момент времени точности ЭО, был применен подход, заключающийся в разработке и совершенствовании согласующей модели радиационного давления. В процессе определения параметров движения НКА по измерительной информации уточнялись не только параметры орбиты, но и коэффициенты светового давления ( $\kappa_1$ ,  $\kappa_2$ ,  $\kappa_3$ ). Единичные значения поправок к данным коэффициентам в значительной мере зависят от погрешностей определения, однако их выборка на длительном интервале (порядка года) несет в себе заметную систематическую составляющую. Анализ выборок поправок к коэффициентам светового давления на длительных интервалах позволил выявить основные периоды возмущений:

- восьмисуточная (17-витковая) периодичность, соответствующая периоду повторяемости трассы НКА ГЛОНАСС (была обусловлена планом измерений средств НКУ, систематической погрешностью измерений, несогласованностью координат измерительных средств);

- полугодовая и годовая периодичность, связанная с изменением склонения Солнца к плоскости орбиты (величина периода указывала на радиационную природу согласованных коэффициентов светового давления).

В результате исследований была построена согласующая модель радиационного давления – формальная модель остаточных немоделируемых ускорений, параметры которой определяются по результатам наблюдений. С помощью гармонического анализа выборок согласуемых параметров ( $\kappa_1$ ,  $\kappa_2$ ,  $\kappa_3$ ) определялись амплитуды и фазы возмущений, которые потом учитывались при моделировании движения.

Подход позволил определить систематические составляющие ошибок априорной модели, характерные для всех НКА группировки, и скорректировать ее параметры для модификации НКА «Глонасс», сформировав согласующую МРД в виде постоянных поправок к коэффициентам светового давления:

$$\Delta\kappa_i = A_0^{(i)}, \quad (3)$$

где  $\Delta\kappa_i$  – поправка к соответствующему коэффициенту светового давления;

$A_0^{(i)}$  – уточняемые коэффициенты согласующей МРД.

Отмечено, что переход на беззапросную технологию эфемеридного обеспечения, в результате которого увеличился объем и качество используемой измерительной информации, позволил модифицировать согласующую МРД для НКА модификации «Глонасс-М», учитывающую не только постоянные поправки, но и их периодические вариации:

$$\begin{aligned} \Delta\kappa_1 &= A_0^{(1)} + 2A_1^{(1)} \sin \alpha, \\ \Delta\kappa_2 &= A_0^{(2)} + A_1^{(2)} \sin \alpha, \\ \Delta\kappa_3 &= A_0^{(3)} + A_1^{(3)} \cos 2\gamma, \end{aligned} \quad (4)$$

где  $\Delta\kappa_i$  – поправка к соответствующему коэффициенту светового давления;

$\gamma$  – склонение Солнца к плоскости орбиты;

$\alpha$  – геоцентрический угол, отсчитываемый в плоскости орбиты от направления на НКА до проекции направления на Солнце;

$A_j^{(i)}$  – уточняемые коэффициенты согласующей МРД.

Приведенная выше согласующая МРД позволила снизить уровень немоделируемых ускорений НКА модификации «Глонасс-М» по сравнению с НКА модификации «Глонасс» в 2 раза, и достичь требуемых на тот момент точностей определения и прогнозирования эфемерид.

По результатам практического применения рассмотренных моделей в ЭО ГЛОНАСС были получены статистические оценки остаточных немоделируемых ускорений. Установлено, что данные модели радиационного давления не могут быть использованы для текущего этапа развития ЭО ГЛОНАСС без проведения доработки. Причинами совершенствования согласующей МРД НКА ГЛОНАСС являются высокие требования к уровню немоделируемых ускорений и точности прогнозирования ЭИ НКА ГЛОНАСС. Предпосылкой совершенствования согласующей МРД НКА ГЛОНАСС является наличие глобальных международных сетей IGS (беззапросных измерителей) и ILRS (лазерных дальномеров), формирующих большой массив измерений по НКА ГЛОНАСС.

Проведен анализ методов учета радиационных возмущений, применяемых для системы GPS. Приведены основные подходы по компенсации влияния солнечной радиации на НКА – построение априорной и эмпирической МРД.

Для получения эмпирических моделей используются измерения глобальной сети БИС по НКА GPS, которые позволяют получить прецизионные параметры орбиты НКА с точностью до 2,5 см (IGS). Главный недостаток эмпирических моделей заключается в потере физического понимания сил, действующих на спутники, что может привести к «нефизичности» полученной орбиты и высоким погрешностям, особенно на интервалах прогнозирования параметров движения НКА.

Также приведены некоторые априорные МРД НКА GPS, ставшие доступными в открытых публикациях. Априорные модели радиационного давления НКА GPS по аналогии с НКА ГЛОНАСС основаны на исходных данных о форме спутников, оптических характеристиках его поверхности, которые измеряются на Земле до запуска, номинальных алгоритмах работы его бортовых систем. Основным недостатком данных моделей является то, что они не могут достаточно точно учитывать реальные возмущения за счет

радиационного давления в процессе существования спутников на орбите, которые обусловлены, например, изменением оптических характеристик поверхностей спутников и (или) отклонением от номинального алгоритма работы СОС и др.

По результатам анализа развития МРД НКА GPS отмечена аналогичная с НКА ГЛОНАСС тенденция развития моделей. Априорная МРД разрабатывается для конкретной модификации НКА, в то же время индивидуально для каждого спутника используется согласование некоторых параметров модели по измерительной информации.

Общим недостатком рассмотренных моделей, является то, что они используются для получения прецизионной апостериорной информации. Они позволяют получить хорошо согласованные параметры орбиты на интервале измерений, однако при прогнозировании параметров движения их погрешность существенным образом возрастает, что особенно заметно на длительных интервалах. Поэтому их использование в эфемеридном обеспечении ГЛОНАСС, где точность прогнозирования является определяющим фактором, без принципиальной доработки невозможна.

Проведены апостериорные исследования возмущений в движении НКА ГЛОНАСС показали, что в поведении немоделируемых ускорений присутствуют детерминированные периодические составляющие. Это факт позволяет построить согласующую модель радиационного давления, аргументами которой будут являться параметры, связанные с основными периодами радиационных возмущений.

По результатам проведенного анализа сформулирована научная задача – разработка методики построения высокоточной согласующей МРД НКА ГЛОНАСС:

**ДАНО:**

$$K_0 = \begin{bmatrix} \kappa_1^0(t_0) & \kappa_2^0(t_0) & \kappa_3^0(t_0) \\ \dots & \dots & \dots \\ \kappa_1^0(t_j) & \kappa_2^0(t_j) & \kappa_3^0(t_j) \\ \dots & \dots & \dots \\ \kappa_1^0(t_k) & \kappa_2^0(t_k) & \kappa_3^0(t_k) \end{bmatrix} \text{ – матрица коэффициентов априорной МРД НКА}$$

ГЛОНАСС на интервале времени  $[t_0, t_k]$ ,

где  $j = \overline{0, k}$ .

$$\Delta K = \begin{bmatrix} \Delta \kappa_1(t_0) & \Delta \kappa_2(t_0) & \Delta \kappa_3(t_0) \\ \dots & \dots & \dots \\ \Delta \kappa_1(t_j) & \Delta \kappa_2(t_j) & \Delta \kappa_3(t_j) \\ \dots & \dots & \dots \\ \Delta \kappa_1(t_k) & \Delta \kappa_2(t_k) & \Delta \kappa_3(t_k) \end{bmatrix} \text{ – матрица поправок к коэффициентам } K_0 \text{ априорной}$$

МРД на интервале времени  $[t_0, t_k]$ ,

где  $\Delta \kappa_i(t_j)$  – результат уточнения коэффициентов априорной МРД;

$j = \overline{0, k}$ ;

$i = 1, 2, 3$ .

**ТРЕБУЕТСЯ:**

– выбрать функциональную зависимость  $G = [G_1, G_2, G_3]^T$  составляющих  $\Delta \kappa_i$ , такую что:

$$\Delta \kappa_i = G_i(\lambda_1, \dots, \lambda_n), i = 1, 2, 3, \quad (5)$$

где  $\lambda_1, \dots, \lambda_n$  – угловые параметры, связанные с периодичностью возмущений от РД;

$n$  – количество угловых параметров;

– найти минимальный порядок функциональной зависимости  $G$ , исходя из критерия требуемой точности прогнозирования эфемерид;

– разработать методику определения значений коэффициентов функциональной зависимости  $G$  (согласующей МРД);

– определить значения коэффициентов согласующей МРД  $G$  индивидуально для каждого НКА ГЛОНАСС.

**Вторая глава** посвящена разработке методики построения высокоточной согласующей модели радиационного давления НКА ГЛОНАСС.

Для решения задачи выбора функциональной зависимости поведения поправок к коэффициентам светового давления рассмотрено относительное положение НКА и Солнца (рисунок 2). Показано, что ориентация НКА ГЛОНАСС строится по двум базовым направлениям – на Землю и Солнце. Система ориентации и стабилизации НКА поддерживает ориентацию ПСБ на Солнце, компенсируя вращение НКА вокруг центра масс, вызванное движением НКА по орбите. Поэтому относительное положение (ориентация) НКА и Солнца может быть описана двумя углами  $\alpha, \gamma$  (рисунок 2). Тогда выборки поправок к коэффициентам светового давления по осям НПССК можно аппроксимировать разложением в ряд по сферическим функциям, и **высокоточная согласующая модель радиационного давления НКА ГЛОНАСС** представляет собой следующее соотношение:

$$\Delta \kappa_i = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^n \left( A_{nm}^{(i)} \cos m\alpha + B_{nm}^{(i)} \sin m\alpha \right) P_{nm}(\sin \gamma), \quad i = 1, 2, 3, n \geq m, \quad (6)$$

где  $A_{nm}^{(i)}, B_{nm}^{(i)}$  – параметры (коэффициенты) разложения;

$\Delta \kappa_i$  – поправки к коэффициентам светового давления априорной МРД по осям НПССК;

$\gamma$  – склонение Солнца к плоскости орбиты;

$\alpha$  – геоцентрический угол, отсчитываемый в плоскости орбиты от направления на НКА до проекции направления на Солнце;

$P_{nm}$  – присоединенные функции Лежандра;

$n$  – порядок разложения;

$m$  – степень разложения.

Отмечено, что угол  $\alpha$  определяет положение НКА в плоскости орбиты, следовательно, период изменения его значений равен времени прохождения НКА одного витка вокруг Земли. Период изменения угла  $\gamma$  составляет чуть менее 1 года. Отличие периода от полного года вызвано прецессией восходящего узла орбиты ГЛОНАСС со скоростью  $\sim 12^\circ/\text{год}$  (вековой уход из-за влияния возмущения, вызванного сжатием Земли). Таким образом, для получения достоверных оценок параметров разложения требуется интервал измерений, равный или больший периоду изменения углов  $\alpha, \gamma$ , т.е. не менее одного года.

Осуществлен выбор оптимальной степени и порядка модели (6). Под оптимальностью в данном случае понимается минимальное количество членов разложения, достаточное в рамках существующих требований к точности прогноза эфемерид НКА. Для этого была проведена априорная оценка точности прогноза ЭИ НКА ГЛОНАСС для различных коэффициентов согласующей МРД (6), отбросив те из них, влияние которых на погрешность прогноза для существующих требований незначительно. Для проведения исследований, по априорной оценке, модель (6) была преобразована к следующему виду, с учетом того, что всегда  $n \geq m$ :

$$\Delta \kappa_i = \sum_{m=0}^n \left( \sum_{n=m}^{\infty} P_{nm}(\sin \gamma) A_{nm}^{(i)} \cos m\alpha + \sum_{n=0}^{\infty} P_{nm}(\sin \gamma) B_{nm}^{(i)} \sin m\alpha \right), \quad i = 1, 2, 3, \quad (7)$$

или, вводя обозначения для  $\sum_{n=m}^{\infty} P_{nm}(\sin \gamma) A_{nm}^{(i)}$  и  $\sum_{n=m}^{\infty} P_{nm}(\sin \gamma) B_{nm}^{(i)}$ , ее можно представить следующим образом:

$$\Delta \kappa_i = \sum_{m=0}^n \left( C_m^{(i)}(\gamma) \cos m\alpha + D_m^{(i)}(\gamma) \sin m\alpha \right), \quad i = 1, 2, 3. \quad (8)$$

Поскольку величина интервала прогноза ЭИ (одни сутки) существенно меньше периода изменения угла  $\gamma$ , то величины коэффициентов, зависящих от  $\gamma$  ( $C_m^{(i)}(\gamma)$  и  $D_m^{(i)}(\gamma)$ ), на суточном интервале были приняты постоянными. При этом задача свелась к поиску оптимальной степени уже одномерного разложения (8) для различных углов  $\gamma$ . Для упрощения исследований, в качестве гипотезы было принято допущение, что найденное значение оптимальной степени разложения  $m$  будет оптимальным и для порядка разложения  $n$ . Суть оценки заключалась в численном расчете производных максимальных погрешностей суточного прогноза ЭИ по коэффициентам  $C_m^{(i)}(\gamma)$  и  $D_m^{(i)}(\gamma)$  при различных значениях  $m$  и  $\gamma$ . Исследованию подлежало поведение следующего параметра:

$$\sqrt{\left[ \frac{\Delta d \text{Re}}{\Delta C_m^{(i)}(\gamma)} \right]^2 + \left[ \frac{\Delta d \text{Re}}{\Delta D_m^{(i)}(\gamma)} \right]^2}, \quad i = 1, 2, 3, \quad (9)$$

где  $d \text{Re}$  – эквивалентная погрешность дальности (ЭПД) за счет ЭИ НКА, которая рассчитывается по формуле:

$$d \text{Re} = \sqrt{0,98^2 dR^2 + 0,14^2 (dL^2 + dN^2)}, \quad (10)$$

где  $dR$  – погрешность координат в направлении по радиус-вектору НКА;  
 $dL$  – погрешность координат в направлении по трансверсали к орбите НКА;  
 $dN$  – погрешность координат в направлении по бинормали к орбите НКА.

Отмечено, что коэффициенты светового давления (2) описывают величину радиационного ускорения в долях притяжения Солнца и являются безразмерными величинами. Для НКА ГЛОНАСС полная величина радиационного возмущения составляет  $\sim 180 \cdot 10^{-7}$  (в безразмерных единицах). При этом погрешность номинальной МРД имеет величину

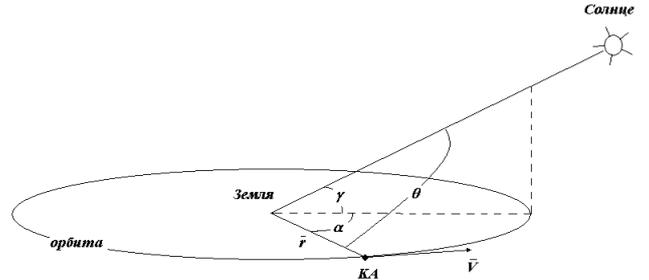


Рисунок 2 – Взаимное положение НКА, Земли и Солнца

$\sim 1 \cdot 10^{-7} \dots 2 \cdot 10^{-7}$ , которая и является уровнем согласующей МРД. Исходя из этого, приращения коэффициентов  $\Delta C_m^{(i)}(\gamma)$  и  $\Delta D_m^{(i)}(\gamma)$  принимались равными  $1 \cdot 10^{-7}$  (уровень согласующей МРД). В качестве допуска рассматривалась величина вызываемого отклонения параметра (9) равная 0,1 м.

По результатам определения оптимальной степени модели (6) и с учетом принятой гипотезы об оптимальности найденного значения степени  $m$  в том числе и для порядка  $n$ , установлено, что целесообразно определять (уточнять) следующие коэффициенты модели (6):

- для  $\kappa_1$  коэффициенты модели второй степени и порядка;
- для  $\kappa_2, \kappa_3$  коэффициенты модели четвертой степени и порядка.

**Методика определения коэффициентов высокоточной согласующей модели радиационного давления.** Предлагается использовать подход с разделением долгопериодической (сезонной) и короткопериодической (витковой) составляющими разложения (6). Суть подхода заключается в двухэтапном определении коэффициентов:

- на первом этапе, с использованием коротких интервалов согласования (сутки), уточняются значения промежуточных коэффициентов разложения (8) при витковой составляющей;
- на втором этапе полученные промежуточные значения коэффициентов обрабатываются на годовом интервале, и по результатам их обработки определяются конечные коэффициенты разложения (6), описывающие сезонную составляющую.

**(I этап) Методика определения промежуточных коэффициентов разложения согласующей модели радиационного давления по прецизионной эфемеридной информации.** На первом этапе в качестве измерительной информации используются прецизионные эфемериды НКА, а вектор уточняемых параметров представляет собой только промежуточные коэффициенты разложения упрощенной согласующей МРД (8)  $C_m^{(i)}(\gamma)$  и  $D_m^{(i)}(\gamma)$ . С использованием указанных данных решается задача уточнения коэффициентов разложения  $C_m^{(i)}(\gamma)$  и  $D_m^{(i)}(\gamma)$  методом наименьших квадратов (МНК). В данном варианте используется суточный интервал накопления прецизионной ЭИ. По результатам одного решения представляется возможным определить коэффициенты упрощенного разложения  $C_m^{(i)}(\gamma)$  и  $D_m^{(i)}(\gamma)$ , которые зависят только от угла  $\alpha$  (витковая периодическая составляющая), так как на нескольких сутках угол  $\gamma$  практически не изменяется. Далее происходит накопление выборок  $C_m^{(i)}(\gamma)$  и  $D_m^{(i)}(\gamma)$  на длительном (годовом) интервале времени.

*Методическая схема:*

Уточнение промежуточных коэффициентов разложения согласующей МРД НКА осуществляется методом наименьших квадратов по следующей схеме:

1. Определяется интервал уточнения, исходя из наличия прецизионной ЭИ НКА;
2. Определяется начальное приближение для промежуточных коэффициентов разложения согласующей МРД;
3. По итерационной схеме рассчитываются матрица частных производных и вектор невязок измеряемых параметров;
4. Из решения системы уравнений определяется вектор поправок к уточняемым параметрам на текущей итерации;
5. Итерации продолжают до тех пор, пока все элементы вектора поправок к уточняемым параметрам не станут достаточно малыми.

Исходными данными для определения промежуточных коэффициентов разложения согласующей МРД являются:

- интервал согласования  $[T_0, T_0 + I]$  – время начала согласования  $T_0$  и длина интервала  $I$  (сутки);
- шаг согласования  $h$  (15 минут);
- прецизионные эфемериды НКА на данном интервале (координаты и скорости в Гринвичской системе координат (ГСК)), которые будут использованы в качестве *измерительной информации*;
- начальные условия движения НКА (координаты и скорости на время начала согласования  $T_0$ ), заданные в ГСК;
- начальное приближение  $P^0 = \{p_j^0\}_{j=1}^s$  вектора уточняемых параметров (нулевые значения).

Особенностью методики является использование прецизионной ЭИ НКА в качестве *измерительной информации*.

**(II этап) Методика определения результирующих коэффициентов разложения согласующей модели радиационного давления.** На втором этапе анализу подлежат результаты уточнения промежуточных коэффициентов  $C_m^{(i)}(\gamma)$  и  $D_m^{(i)}(\gamma)$  на длительном (годовом) интервале времени. Имея данную выборку уточненных коэффициентов  $C_m^{(i)}(\gamma)$  и  $D_m^{(i)}(\gamma)$  на длительном интервале, появляется возможность уточнить МНК конечные коэффициенты разложения (7)  $A_{nm}^{(i)}, B_{nm}^{(i)}$ , зависящие не только от угла  $\alpha$  (витковая периодическая составляющая), но и от угла  $\gamma$  (сезонная периодическая составляющая), так как описанные выше коэффициенты связаны соотношением:

$$\begin{aligned} C_m^i(\gamma) &= \sum_{n=m}^{\infty} P_{nm}(\sin \gamma) A_{nm}^i, \\ D_m^i(\gamma) &= \sum_{n=m}^{\infty} P_{nm}(\sin \gamma) B_{nm}^i. \end{aligned} \quad (11)$$

*Методическая схема:*

Уточнение коэффициентов разложения согласующей МРД НКА осуществляется по следующей схеме:

1. Предварительный анализ выборок уточненных коэффициентов  $C_m^{(i)}(\gamma)$  и  $D_m^{(i)}(\gamma)$  НКА с целью определения интервала уточнения коэффициентов разложения.
2. Определение начального приближения для коэффициентов разложения согласующей МРД;
3. Определение расчетных значений  $C_m^{(i)}(\gamma)$ ,  $D_m^{(i)}(\gamma)$  и расчет частных производных от измеряемых параметров по уточняемым на моменты измерений.
4. По итерационной схеме рассчитываются матрица частных производных и вектор невязок измеряемых параметров;
5. Из решения системы уравнений определяется вектор поправок к уточняемым параметрам на текущей итерации;
6. Итерации продолжаются до тех пор, пока все элементы вектора поправок к уточняемым параметрам не станут достаточно малыми.

Исходными данными для уточнения коэффициентов разложения согласующей МРД являются:

- интервал уточнения  $[T_0, T_0 + I]$  – время начала  $T_0$  и длина интервала  $I$  (1 год);
- шаг уточнения  $h$  (сутки);
- результаты решений согласования коэффициентов упрощённой согласующей МРД  $C_m^{(i)}(\gamma)$  и  $D_m^{(i)}(\gamma)$  в соответствии с (8) на заданном интервале  $I$ . В результате имеем выборки значений промежуточных коэффициентов на интервале  $I$  для различных углов  $\gamma$ , которые в дальнейшем используются в качестве *измерительной информации*.

- начальное приближение  $P^0 = \{p_j^0\}_{j=1}^s$  вектора уточняемых параметров (нулевые значения).

Особенностью методики является наличие двух этапов для определения результирующих коэффициентов  $A_{nm}^{(i)}, B_{nm}^{(i)}$  (6).

**Третья глава** посвящена экспериментальной отработке разработанной высокоточной согласующей модели радиационного давления и методики уточнения ее параметров.

Экспериментальная отработка модели и методики проведена с использованием орбитальной группировки (ОГ) НКА ГЛОНАСС – 24 функционирующих в штатном режиме аппарата по состоянию на 1 июля 2018 г. Интервалом согласования коэффициентов МРД (предыстория) был выбран 01.01.2017 – 01.04.2018. Оценка точности прогнозирования ЭИ НКА проводилась в интервалах 15.07.2018 – 19.07.2018 и 01.08.2018 – 31.08.2018. Это было обусловлено следующим:

- в данных интервалах времени состав ОГ претерпевал незначительные изменения при постоянном наличии штатно функционирующих НКА в количестве 20 – 24 аппаратов;

- интервал предыстории составляет более года, что обеспечивает хорошее наблюдение сезонной составляющей возмущения;

- наличием в интервале оценки прогноза ЭИ у НКА хотя бы одной из плоскостей ОГ ГЛОНАСС так называемых «теневых» сезонов.

Расчёты были выполнены с помощью специального программно-математического обеспечения системы высокоточного определения эфемерид и временных поправок (СВОЭВП), модернизированного в части разработанной высокоточной согласующей МРД. В качестве прецизионной ЭИ использовались окончательные данные СВОЭВП.

#### **Определение параметров согласующей модели радиационного давления.**

В процессе определения коэффициентов модели было установлено, что их значения существенно различаются при «теневых» и «бестеневых» сезонах. Таким образом, эксперимент подтвердил факт о различии поведения системы ориентации и стабилизации НКА на «теневых» участках и в условиях отсутствия теней Земли. Для лучшего согласования коэффициенты уточнялись отдельно применительно к «теневым» и «бестеневым» сезонам, т. е. фактически по отношению к каждому НКА рассчитывались два набора коэффициентов, первый из которых соответствовал согласующей МРД в «бестеневые» сезоны («световая» модель), второй – орбитам при наличии «теневых» сезонов («теневая» модель). Ввиду незначительного изменения угла склонения Солнца к плоскости орбиты в «теневые» сезоны (примерно от  $+15^\circ$  до  $-15^\circ$ ) количество согласуемых параметров «теневой» модели сокращалось – уточнялись коэффициенты при  $m = 1, \dots, 4$  и  $n = m, m + 1$  ( $n$  – порядок,  $m$  – степень модели (7)), коэффициенты главной и находящейся под ней диагоналей.

Представлены результаты расчета коэффициентов согласующей МРД (рисунок 3, 4) для некоторых НКА: красные точки – результаты определения промежуточного коэффициента на первом этапе разработанной методики, жёлтая линия – восстановленная сезонная зависимость при уточнённых окончательных коэффициентах.

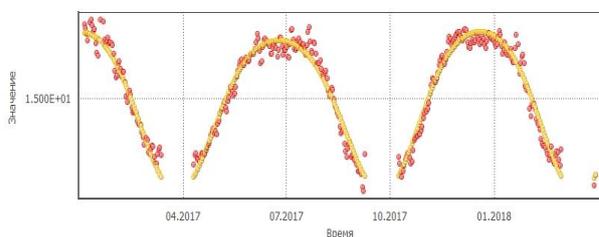


Рисунок 3 – Реализации определения промежуточного коэффициента  $C_0^{(1)}(\gamma)$  и построенная по ним модель с использованием уточненных коэффициентов  $A_{00}^{(1)}, A_{10}^{(1)}, A_{20}^{(1)}, A_{30}^{(1)}, A_{40}^{(1)}$  НКА №R08 для «бесневых» сезонов

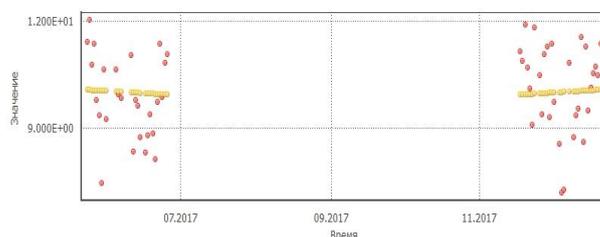


Рисунок 4 – Реализации определения промежуточного коэффициента  $C_0^{(1)}(\gamma)$  и построенная по ним модель с использованием уточненных коэффициентов  $A_{00}^{(1)}, A_{10}^{(1)}$  НКА №R19 для «тневых» сезонов

Проведен анализ результатов, на основе которого установлено следующее:

- схожесть значений однотипных коэффициентов для разных НКА внутри одной модификации («Глонасс-М»); данный факт позволяет использовать средние значения однотипных коэффициентов для вновь запущенных НКА, по которым еще не накоплено достаточное количество исходных данных;
- значительные различия значений однотипных коэффициентов для НКА разных модификаций («Глонасс-М» и «Глонасс-К»);
- выделяющаяся периодическая составляющая уточнённых промежуточных коэффициентов  $C_m^{(i)}(\gamma)$  и  $D_m^{(i)}(\gamma)$  для низкой степени разложения;
- реализации уточненных промежуточных коэффициентов  $C_m^{(i)}(\gamma)$  и  $D_m^{(i)}(\gamma)$  высоких степеней разложения отличаются повышенной шумовой составляющей;
- окончательные коэффициенты  $A_{nm}^{(i)}, B_{nm}^{(i)}$  модели высоких порядков близки к нулю;
- большой разброс промежуточных коэффициентов для «тневых» моделей обусловлен худшими точностными характеристиками эфемерид НКА на «тневых» сезонах.

### **Результаты оценки точности прогнозирования эфемеридной информации навигационных космических аппаратов системы ГЛОНАСС.**

Проведена оценка точности прогнозирования ЭИ НКА на интервалах 15.07.2018 – 19.07.2018 и 01.08.2018 – 31.08.2018. Оцениваемым параметром являлась ЭПД прогнозируемых на 15-часовом интервале эфемерид относительно прецизионных данных СВОЭВП. Для сравнения приведены ТХ эфемерид при существующей согласующей (5) и разработанной высокоточной согласующей моделях радиационного давления. Решения соответствовали каждому витку в рассматриваемых интервалах, таким образом, оценка содержит примерно 77 – 78 реализаций применительно к каждому НКА, включающих в

том числе и прохождение «теневых» участков. Результаты оценки, подтверждающие повышение точности прогнозирования эфемерид при использовании разработанной согласующей МРД, проиллюстрированы диаграммами (рисунок 5, 6).

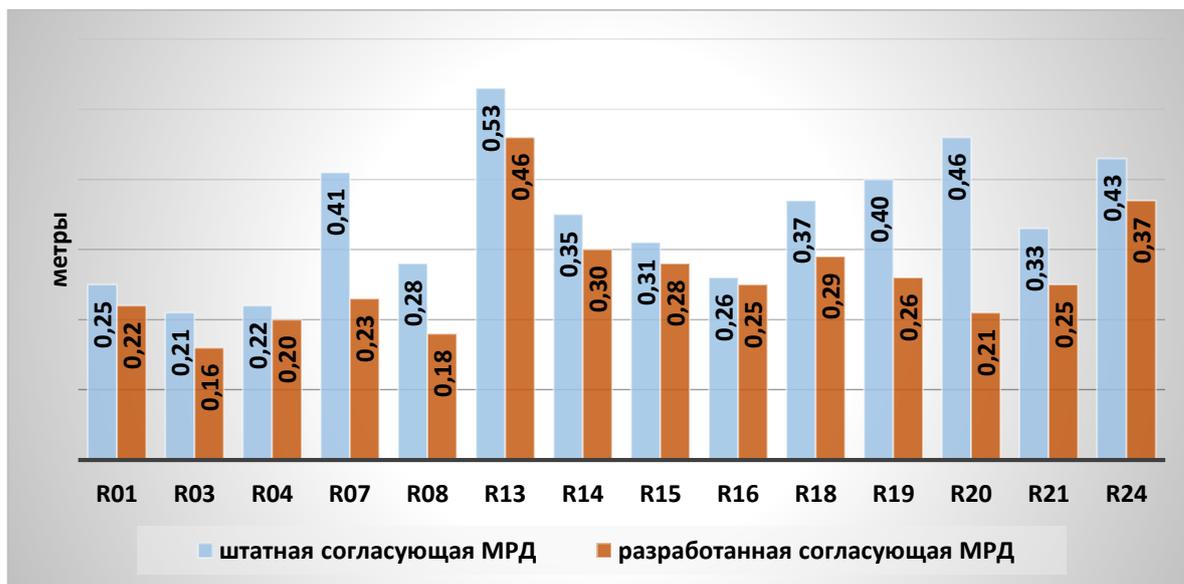


Рисунок 5 – ЭПД 15-ти часового прогноза ЭИ по уровню частоты 0,67, с использованием существующей согласующей МРД (5) и разработанной согласующей МРД на интервале 15.07.2018 – 19.07.2018 (наличие «теневых» сезонов для НКА R13, R14, R15, R16)

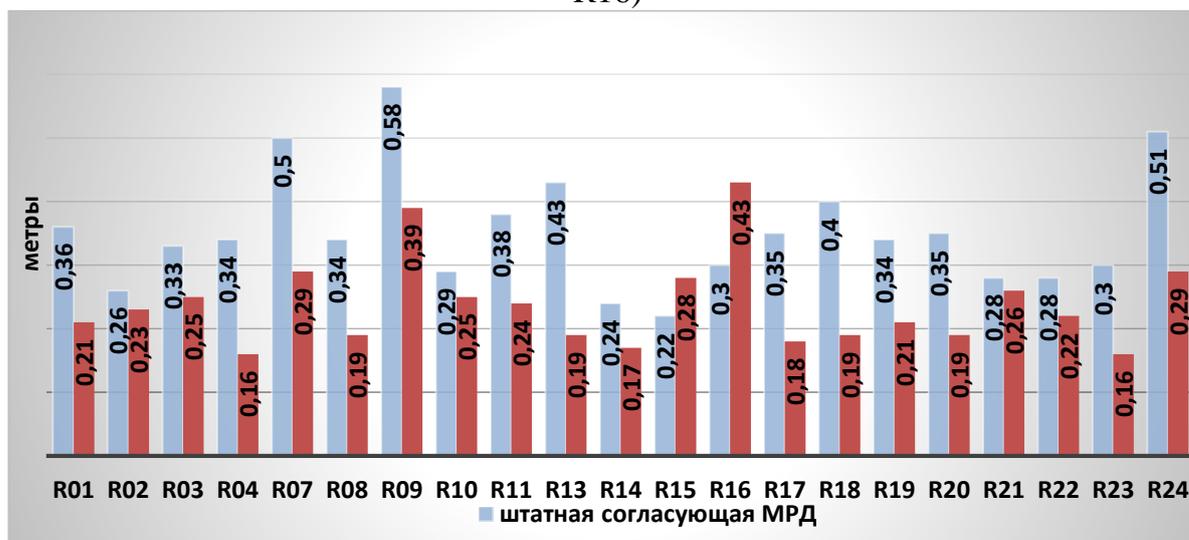


Рисунок 6 – ЭПД 15-ти часового прогноза ЭИ по уровню частоты 0,67, с использованием существующей согласующей МРД (5) и разработанной согласующей МРД на интервале 01.08.2018 – 31.08.2018

Анализируя приведенные оценки 15-ти часового прогноза эфемерид, при использовании существующей согласующей МРД «Глонасс-М» (4) и разработанной согласующей МРД, можно сделать следующие выводы:

- при использовании разработанной согласующей МРД погрешность 15-ти часового прогноза эфемерид меньше на ~ 25%;
- точность прогноза эфемерид повышается как для «теневых» сезонов, так и для участков орбит НКА без теней Земли;

– точность прогноза эфемерид повышается и для НКА №R14, запущенного 22.09.2017, параметры разработанной согласующей МРД которого определялись путем осреднения значений однотипных коэффициентов внутри одной модификации («Глонасс-М»).

Представлены предложения по использованию параметров согласующей модели радиационного давления НКА ГЛОНАСС, которые состоят из нескольких этапов:

1. Начало штатной эксплуатации первого НКА определенного типа  $T$ . На данном этапе в центре управления системой (ЦУС) ГЛОНАСС используются нулевые значения коэффициентов согласующей МРД. Постоянные значения поправок к номинальным коэффициентам МРД по направлениям НПССК ( $\Delta k_i$ ) определяются в процессе штатного ЭО.

2. Начало штатной эксплуатации НКА типа  $T$ . На данном этапе эксплуатации НКА в ЦУС используются средние значения коэффициентов согласующей МРД, полученные по ранее запущенным НКА типа  $T$ .

3. Набор первичной статистики по НКА типа  $T$ . Этап набора статистики проводится на интервале от двух недель до шести месяцев. На данном этапе в апостериорном контуре СВОЭВП по разработанным методикам уточняются и передаются в ЦУС для использования значения коэффициентов разложения  $A_{00}^{(i)}$ . Значения старших коэффициентов разложения используются те же, что и на втором этапе.

4. Штатный режим определения коэффициентов согласующей МРД НКА типа  $T$ . Характеризуется наличием предыстории на интервале более одного года. На данном этапе в апостериорном контуре СВОЭВП по разработанным методикам, уточняются и передаются в ЦУС для использования значения всех коэффициентов разложения. Периодичность проведения определения коэффициентов – 1 раз в неделю на скользящем годичном интервале предыстории.

5. При выводе НКА из режима штатной эксплуатации, связанной с нарушением или изменением режима работы системы ориентации и стабилизации, либо других систем, функционирование которых влияет на характеристики параметров МРД, и последующем вводе НКА в штатную эксплуатацию осуществляется переход к этапу накопления первичной статистики (этап 3).

### 3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации решена актуальная научная задача разработки высокоточной согласующей МРД НКА ГЛОНАСС и методики определения ее параметров, имеющие существенное значение для обеспечения требуемой в рамках Федеральной целевой программы «Поддержание, развитие и использование системы ГЛОНАСС на 2012-2020 годы» точности ЭИ навигационных сообщений космического сегмента ГЛОНАСС.

Основные научно-методические и практические результаты работы состоят в следующем.

1. Показано, что для выполнения требований к ЭИ НКА ГЛОНАСС, предъявленных в Федеральной целевой программы «Поддержание, развитие и использование системы ГЛОНАСС на 2012-2020 годы», необходима реализация мероприятий по снижению погрешностей прогнозирования эфемерид НКА ГЛОНАСС, в первую очередь, за счет компенсации немоделируемых ускорений учета сил радиационного давления в модели движения НКА. Используемые модели учета радиационных возмущений для эфемеридного обеспечения не обеспечивают требуемую точность прогнозирования ЭИ НКА ГЛОНАСС. Проанализированы существующие МРД, выявлены проблемные вопросы

учета радиационных возмущений, решение которых позволит обеспечить достижение целевых показателей ФЦП ГЛОНАСС на 2012-2020 гг., предъявляемых к космическому комплексу системы ГЛОНАСС.

2. Решение научной задачи разработки методики построения высокоточной согласующей МРД НКА ГЛОНАСС включает несколько этапов. На первом этапе осуществляется разработка вида модели, определение состава параметров модели. На втором этапе проводится разработка методики определения промежуточных коэффициентов модели, описывающих короткопериодические (витковые) возмущения, основанная на использовании прецизионных эфемерид, на коротких интервалах согласования. На третьем этапе проводится разработка методики определения конечных коэффициентов модели, описывающих долгопериодические (сезонные) возмущения, основанная на использовании промежуточных коэффициентов модели, определенных на втором этапе, на длительных интервалах согласования.

3. Разработана новая высокоточная согласующая модель радиационного давления НКА ГЛОНАСС, которая отличается от существующих аналогов структурой модели и настраиваемая в зависимости от условий освещенности орбиты НКА.

4. Определен минимальный порядок и степень модели исходя из требований к ЭПД суточного прогноза ЭИ. Для этого была проведена априорная оценка влияния коэффициентов высокоточной согласующей модели радиационного давления на погрешность суточного прогноза ЭИ НКА ГЛОНАСС

5. Разработана двухэтапная методика определения параметров высокоточной согласующей модели радиационного давления НКА ГЛОНАСС по прецизионной эфемеридной информации. Методика отличается адаптивными к составу и объему измерительной информации технологическими параметрами уточнения, включающими весовые характеристики измерений, интервал уточнения и состав параметров согласующей модели радиационного давления. На первом этапе разработанной методики уточняются промежуточные коэффициенты упрощенной модели, описывающие влияние короткопериодических (витковых) возмущений, на втором этапе определяются окончательные коэффициенты разработанной модели, которые описывают короткопериодические (витковые) и долгопериодические (сезонные) возмущения.

6. Проведено исследование точности эфемеридного обеспечения системы ГЛОНАСС с использованием новой высокоточной согласующей модели радиационного давления. Установлено, что погрешность 15-часового прогноза ЭИ для текущих технологий расчета ЭО ГЛОНАСС в режиме применения разработанной высокоточной согласующей модели радиационного давления уменьшается на ~25% по сравнению с вариантом использования в ЭО ГЛОНАСС существующей модели радиационного давления.

7. Разработаны предложения по использованию высокоточной согласующей модели радиационного давления в эфемеридном обеспечении ГЛОНАСС и порядок расчета коэффициентов модели. Предложения разбиты на несколько этапов. Первый этап – начало штатной эксплуатации НКА определенного типа. Второй этап – набор статистики по НКА определенного типа. Третий этап – штатный режим определения параметров высокоточной согласующей МРД НКА определенного типа.

8. Работа является итогом исследований по вопросам повышения точности эфемерид навигационных сообщений НКА ГЛОНАСС, проводившейся в рамках НИР и ОКР Федеральных целевых программ «Глобальная навигационная система» на период 2002-2011 гг. и «Поддержание, развитие и использование системы ГЛОНАСС на 2012-2020 годы».

Результаты выполненных научных исследований реализованы при техническом проектировании ОКР «Сантиметр» и в комплексе программ ИБПА.466535.055, прошедшем межведомственные испытания;

Результаты исследований в дальнейшем могут использоваться при разработке и совершенствовании моделей учета радиационных возмущений для повышения точности расчета ЭИ, обосновании требований к космическому сегменту, разработке программно-методического обеспечения по расчету ЭИ.

В качестве направлений дальнейших исследований могут быть рассмотрены:

- совершенствование разработанной согласующей МРД при ужесточении требований к ЭИ НКА ГЛОНАСС;
- применение разработанной согласующей МРД без априорной МРД, в том числе и для НКА зарубежных глобальных навигационных систем.

Личный вклад в разработку материалов диссертации заключается:

- в проведенном системном анализе методов и моделей, используемых для учета радиационных возмущений, их применимости в модели движения НКА ГЛОНАСС;
- в определении необходимого состава уточняемых параметров высокоточной согласующей МРД НКА ГЛОНАСС с учетом требований по точности ЭИ;
- в разработке методики определения параметров высокоточной согласующей модели радиационного давления НКА ГЛОНАСС по прецизионной эфемеридной информации;
- в экспериментальном подтверждении достоверности и практической полезности модели и методики;
- в обосновании предложений по использованию параметров высокоточной согласующей модели радиационного давления в цикле эфемеридного обеспечения ГЛОНАСС и порядка расчета коэффициентов модели.

#### **4. ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

##### **Публикации в рецензируемых изданиях:**

1. Бурдин И.А., Хомяк Р.В. Использование согласующей модели радиационного давления для повышения точности прогнозирования эфемеридной информации ГЛОНАСС // Научно-технический журнал «Космонавтика и ракетостроение». ЦНИИмаш, 2017. вып.1(94). С. 103 – 109. – 7 с. (3,5 с. авт.).

Соискателем предложена технология формирования коэффициентов согласующей МРД, применение которой позволяет снизить погрешность прогнозирования эфемерид НКА.

2. Бурдин И.А., Хомяк Р.В. Модель радиационного давления навигационного КА «Глонасс-М» // Научно-технический журнал «Двойные технологии». 2018. вып.1(82). С. 19–21. – 3 с. (1 с. авт.).

Соискателем предложена согласующая МРД нового вида, применение которой позволяет уменьшить погрешности прогнозирования эфемерид.

3. Бурдин И.А., Хомяк Р.В. Определение состава коэффициентов согласующей модели радиационного давления НКА ГЛОНАСС // Научно-технический журнал «Космонавтика и ракетостроение». ЦНИИмаш. 2017. вып.6(99). С.116–120. – 4,5 с. (2 с. авт.).

Соискателем проведены исследования и представлены результаты по определению оптимального порядка согласующей МРД, полученные по априорным оценкам влияния коэффициентов согласующей МРД на погрешность суточного прогноза параметров движения НКА ГЛОНАСС.

4. Бурдин И.А., Хомяк Р.В. Экспериментальное определение значений коэффициентов согласующей модели радиационного давления НКА ГЛОНАСС // Научно-технический журнал «Космонавтика и ракетостроение». ЦНИИмаш. 2018. вып.6(105). С.48–55. – 7,2 с. (3,2 с. авт.).

Соискателем предложена методика формирования коэффициентов согласующей МРД, проведены исследования и представлены результаты экспериментального определения значений коэффициентов согласующей МРД и оценки точности прогнозирования эфемерид НКА ГЛОНАСС.

**Прочие публикации:**

1. Бурдин И.А. Подход к компенсации радиационных возмущений движения НКА Глонасс-М при прохождении «теневых» участков орбит // Сборник статей VII научно-технической конференции молодых ученых и специалистов Центра управления полетами. ЦНИИмаш. 2017. С.297–301. – 4,3 с.

Предложена согласующая модель радиационного давления с уточнением параметра согласования в направлении по трансверсали к орбите НКА при прохождении им «теневых» участков орбит, схема уточнения коэффициентов модели, которым представлен данный согласуемый параметр. Применение предложенной модели позволяет снизить погрешность суточного прогноза эфемерид НКА ГЛОНАСС-М при прохождении им «теневых» участков орбит.

2. Бурдин И.А., Пасынков В.В., Хомяк Р.В. Методические подходы к моделированию радиационных возмущений в движении навигационных КА // Всероссийская конференция «Фундаментальное и прикладное координатно-временное и навигационное обеспечение» (КВНО – 2017). Труды института прикладной астрономии РАН. 2017. вып. 42. – СПб.: ИПА РАН, С.49–56. – 8 с. (3 с. авт.).

Соискателем рассмотрены основные подходы по компенсации влияния солнечной радиации на НКА, основанные на построении априорной и согласующей моделей. Проведен анализ существующих априорных и согласующих МРД НКА ГЛОНАСС и GPS.

3. Бурдин И.А., Хомяк Р.В. Этапы развития модели радиационного давления НКА ГЛОНАСС // XXII международная научная конференция «Системный анализ, управление и навигация». Тезисы докладов. – М.: МАИ, 2017. С.103–104. – 1 с. (0,5 с. авт.).

Соискателем предложена новая согласующая МРД НКА ГЛОНАСС, позволяющая повысить точностные характеристики прогнозирования ЭИ НКА ГЛОНАСС.

4. ИБПА.466535.055ПЗ3.3. Система прецизионной навигации МО РФ (Шифр ОКР – «Сантиметр»). Технический проект. Пояснительная записка. Часть 4. Центр определения прецизионной информации по данным международных средств (ЦПИ-М) СПН МО. Книга 3. Технологии расчета данных. ПЗ-03. – М.: ОАО «НПК «СПП», 2014. – 260 с. (6 с. авт.).

Соискателем изложены предложения по использованию параметров согласующей модели радиационного давления НКА ГЛОНАСС в оперативном эфемеридном обеспечении.

5. ИБПА.466535.055ПЗ9. Система прецизионной навигации МО РФ (Шифр ОКР – «Сантиметр»). Технический проект. Пояснительная записка. Часть 10. Методическое обеспечение. ПЗ-09. – М.: ОАО «НПК «СПП», 2014. – 365 с. (10 с. авт.).

Соискателем предложены априорная и согласующая модели радиационного давления НКА ГЛОНАСС для реализации в специальном программном математическом обеспечении (СПМО).