

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»

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»

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
доктор технических наук,
старший научный сотрудник
Пасынков Владимир Викторович

Москва 2019

ОГЛАВЛЕНИЕ

| | |
|--|-----|
| Введение | 3 |
| 1. Анализ методов учета радиационных возмущений в модели движения навигационных космических аппаратов и постановка задачи | 11 |
| 1.1. Анализ возмущений, действующих на навигационные космические аппараты, и факторов, определяющих погрешности их моделирования | 11 |
| 1.2. Анализ методов учета радиационных возмущений в модели движения навигационных космических аппаратов | 15 |
| 1.3. Исходные данные и постановка задачи | 35 |
| 2. Методика построения высокоточной согласующей модели радиационного давления навигационных космических аппаратов системы ГЛОНАСС | 43 |
| 2.1. Вид высокоточной согласующей модели радиационного давления..... | 43 |
| 2.2. Определение порядка и степени высокоточной согласующей модели радиационного давления | 44 |
| 2.3. Методика определения коэффициентов высокоточной согласующей модели радиационного давления..... | 49 |
| 3. Оценка точности прогнозирования параметров движения навигационных космических аппаратов системы ГЛОНАСС с учетом использования высокоточной согласующей модели радиационного давления | 66 |
| 3.1. Исходные данные и план эксперимента | 66 |
| 3.2. Определение параметров согласующей модели радиационного давления | 70 |
| 3.3. Результаты оценки точности прогнозирования эфемеридной информации навигационных космических аппаратов системы ГЛОНАСС | 93 |
| 3.4. Предложения по использованию согласующей модели радиационного давления в эфемеридном обеспечении системы ГЛОНАСС | 100 |
| Заключение..... | 102 |
| Список сокращений и условных обозначений | 106 |
| Список литературы..... | 109 |
| Приложение А. Графики с результатами определения значений коэффициентов высокоточной согласующей МРД отдельно по каждому НКА ГЛОНАСС | 117 |

ВВЕДЕНИЕ

В 2011 году завершены мероприятия Федеральной целевой программы [38] «Глобальная навигационная система» на период 2002-2011 гг. Цели программы в основном достигнуты – обеспечено существенное повышение точности услуг, предоставляемых потребителям системы ГЛОНАСС. Системные характеристики ГЛОНАСС доведены до паритетного уровня с характеристиками зарубежного аналога – системы GPS [37]. Федеральной целевой программой «Поддержание, развитие и использование системы ГЛОНАСС на 2012-2020 годы» [39] 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 ФЦП [22] 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 – 2011 гг. можно зафиксировать следующий этап ужесточения требований к ЭИ в соответствии с Федеральной целевой программой «Глобальная навигационная система» на период 2002-2011 гг. [38]. Исходя из приведенных в [38] требований, проводились работы по модернизации и развитию эфемеридного обеспечения системы ГЛОНАСС. Совершенствованию моделей и технологий, применяемых в интересах системы ГЛОНАСС для обеспечения потребителей эфемеридной информацией, посвящены работы большого количества авторов: Бартенева В.А [2,3], Брагинца В.Ф. [4], Гаязова И.С. [14], Гречкосеева А.К. [2,17], Дворкина В.В. [18], Жукова А.Н. [37], Забокрицкого А.В. [5], Карутина С.Н. [23], Коробкина В.А. [26,27], Куропятникова А.Д. [29], Красильщикова М.Н. [3], Неволько М.П. [5], Панюшина А.Н. [34,35], Пасынкова В.В. [3,37], Ревнивых С.Г. [16], Хомяка Р.В. [37], Урличича Ю.М. [28] и др.

Найденные авторами решения отдельных задач, совместно с примененными подходами, позволили добиться достижения требований к ЭИ навигационных сообщений космического сегмента ГЛОНАСС, которые предъявлялись в период 1980 – 2011 гг.

Начиная с 2012 г. можно отметить начало очередного этапа повышения требований к точности прогнозирования ЭИ НКА ГЛОНАСС, которые определяются ФЦП [22]. 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. [3], Гаязова И.С. [14], Глотова В.Д. [16], Гречкосеева А.К. [3,17], Коробкина В.А. [26,27], Куропятникова А.Д. [29,34,35], Марарескул Т.А. [17], Митрикаса В.В. [16], Панюшина А.Н. [34,35], Хомяка Р.В. [40] 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 эфемерид 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.

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).

Основные положения диссертационной работы опубликованы в 8 научных работах (в 6 статьях [6,7,8,9,10,11], в том числе 4 рецензируемых статьях [8,9,10,11], техническом проекте [19,20,21] и сборнике тезисов докладов [12]).

Внедрение результатов диссертационной работы. Полученные результаты были использованы в процессе выполнения государственной опытно-

конструкторской работы (ОКР «Сантиметр»), что подтверждается материалами технического проекта [19,20,21].

Структура работы. Работа состоит из введения, трех глав, заключения и одного приложения.

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. Проведен анализ методов учета радиационных возмущений, применяемых в ЭО ГЛОНАСС и для системы GPS. Приведены основные подходы по компенсации влияния солнечной радиации на НКА – построение априорной и согласующей МРД. Отмечено, что задача построения высокоточной априорной модели является чрезвычайно трудоемкой. Для ее решения требуется: большой объем исходных данных; проведение большого количества экспериментов; индивидуальный подход к каждому НКА. Причем конечный результат непрогнозируем, так как некоторые характеристики НКА, являющиеся основой модели, с течением времени изменяются [3]. Поэтому путь совершенствования согласующей МРД является наиболее перспективным и эффективным. Проведенные исследования на предмет определения НМУ в движении НКА ГЛОНАСС показывают, что в поведении выборок поправок к коэффициентам светового давления присутствует детерминированная составляющая, характерная для каждого коэффициента. Это 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.

Вторая глава посвящена разработке методики построения высокоточной согласующей модели радиационного давления НКА ГЛОНАСС. Разработана структура новой высокоточной согласующей модели радиационного давления. Для определения состава уточняемых параметров модели была проведена

априорная оценка влияния коэффициентов высокоточной согласующей модели радиационного давления на погрешность суточного прогноза ЭИ НКА ГЛОНАСС. Изложена двухэтапная методика определения коэффициентов высокоточной согласующей модели радиационного давления, основанная на использовании прецизионных эфемерид. На первом этапе разработанной методики уточняются коэффициенты упрощенной модели, описывающие влияние короткопериодических (витковых) возмущений, на втором этапе определяются окончательные коэффициенты разработанной модели, которые описывают короткопериодические (витковые) и долгопериодические (сезонные) возмущения.

Третья глава посвящена экспериментальной отработке представленной высокоточной согласующей модели радиационного давления. С использованием разработанной методики определения коэффициентов получены значения ее параметров. Проведена оценка точности прогнозирования параметров движения НКА ГЛОНАСС с использованием высокоточной согласующей модели радиационного давления, которая показала улучшение точности суточного прогноза эфемерид на $\sim 25\%$. Разработаны предложения по использованию коэффициентов высокоточной согласующей модели радиационного давления в эфемеридном обеспечении ГЛОНАСС.

В заключении сформулированы основные научно-методические и практические результаты, полученные при выполнении исследований. Приведены данные о реализации проведенных исследований и сведения о возможном эффекте от использования результатов. Указана область возможного использования результатов исследований и определены основные направления дальнейших работ.

В приложении А представлены графики с результатами определения значений коэффициентов высокоточной согласующей МРД отдельно по каждому НКА ГЛОНАСС.

1. АНАЛИЗ МЕТОДОВ УЧЕТА РАДИАЦИОННЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ В МОДЕЛИ ДВИЖЕНИЯ НАВИГАЦИОННЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

1.1. Анализ возмущений, действующих на навигационные космические аппараты, и факторов, определяющих погрешности их моделирования

Для решения проблемы повышения точности прогнозирования эфемерид НКА ГЛОНАСС необходимо провести оценку вклада основных источников ошибок модели движения. Естественные силы, действующие на НКА, делятся на консервативные (гравитационные) и неконсервативные, к которым относятся радиационные возмущения. В настоящее время в МД НКА ГЛОНАСС учитываются возмущения, обусловленные воздействием следующих факторов:

- гравитационное поле Земли (ГПЗ), включая его вариации за счет приливных эффектов;
- гравитационное воздействие Луны, Солнца и планет, включая влияние нецентральности поля Земли на пертурбационную функцию Луны;
- радиационное давление на поверхность НКА вследствие прямого излучения Солнца, отраженной и инфракрасной радиации Земли, собственного излучения НКА.

Основные возмущения, действующие на НКА системы ГЛОНАСС, их максимальные значения и точность их знания, в соответствии с [31], приведены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Возмущения, действующие на НКА системы ГЛОНАСС

| Возмущения, учитываемые в МД НКА ГЛОНАСС | | Величина ускорения возмущения, м/с ² | Погрешность учета возмущения (СКО), м/с ² |
|--|------------------|---|--|
| гравитационное поле Земли (модель ПЗ-90.11) | центральное поле | $6,1 \cdot 10^{-1}$ | Менее 10^{-11} |
| | сжатие | 10^{-4} | Менее 10^{-11} |
| | аномалии | $2 \cdot 10^{-7}$ | Менее 10^{-11} |
| радиационное давление | | 10^{-7} | 10^{-10} |
| лунно-солнечные приливные эффекты | | $2 \cdot 10^{-9}$ | $2 \cdot 10^{-11}$ |
| гравитация Луны | | $4 \cdot 10^{-6}$ | Менее 10^{-11} |
| гравитация Солнца | | 10^{-6} | Менее 10^{-11} |
| гравитация Венеры | | $1,1 \cdot 10^{-10}$ | Менее 10^{-11} |
| гравитация Марса | | $3,8 \cdot 10^{-12}$ | Менее 10^{-11} |
| гравитация Юпитера | | $2,4 \cdot 10^{-11}$ | Менее 10^{-11} |

Из анализа данных, приведенных в таблице 1.1, следует, что погрешности знания коэффициентов ГПЗ системы геодезических параметров «Параметры Земли 1990 года» (ПЗ-90.11) [36] в настоящее время являются существенно менее значимыми по сравнению с возмущениями от сил радиационного давления. Таким образом, можно сделать вывод о том, что основными источниками ошибок МД НКА являются погрешности учета возмущения за счет радиационного давления.

Оценка погрешности модели сил радиационного давления получена по экспериментальным данным [32,33] с использованием модели радиационного давления, используемой на текущем этапе развития ГЛОНАСС, которая на данный момент в максимальной мере учитывает основные аспекты влияния на НКА сил светового давления. Однако, несмотря на это, проведенные

исследования показывают, что существующий уровень ошибок эфемерид вследствие радиационного давления остается самым значительным. Их основными причинами 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 изменения оптических характеристик поверхности за время активного существования НКА.

При рассмотрении источников НМУ следует, в первую очередь, отметить немоделируемые вариации силы радиационного давления (РД), возникающие за счет погрешностей ориентации панелей солнечных батарей на Солнце. Решение проблемы снижения погрешностей ориентации ПСБ на всех участках орбиты требует реализации принципиально новой, более сложной системы ориентации и стабилизации (СОС) НКА.

Со временем оптические характеристики корпуса НКА и его ПСБ изменяются, что приводит к возникновению дополнительных неопределенностей при моделировании сил светового давления. Вопрос о коррекции данных параметров в настоящее время затруднен ввиду полного отсутствия достоверной информации о таких физических процессах. Он также становится значимым и в свете увеличения сроков функционирования объектов на орбите до 10 лет и более.

Вариации силы РД, обусловленные работой бортовой системы терморегулирования (СТР), также необходимо принимать во внимание. Отсутствие достоверных данных для моделирования СТР на интервале прогнозирования в ряде ситуаций приводит к возникновению заметных ошибок прогнозирования параметров движения НКА.

Приведенные факторы оказывают наибольшее влияние при долгосрочном (60 суток) прогнозировании эфемерид. Погрешности краткосрочного прогноза ЭИ (15 часов) [3] не так велики, но существенны в рамках рассматриваемых требований к точности бортовой ЭВИ [22].

Ошибки долгосрочного и краткосрочного прогноза эфемерид НКА ГЛОНАСС, полученные по результатам апостериорной оценки точности,

приведены в таблице 1.2. Оценка проводилась с помощью специального программно-математического обеспечения (СПМО) Системы высокоточного определения эфемерид и временных поправок (СВОЭВП) [15]. В качестве эталонных данных использовалась прецизионная информация СВОЭВП. СВОЭВП является функциональным дополнением ГЛОНАСС и предназначена для расчета и представления потребителям прецизионных эфемерид и поправок к бортовым шкалам времени НКА ГЛОНАСС и GPS, а также других данных, позволяющих повысить точность решения потребителями ГЛОНАСС и GPS задач определения местоположения, скорости движения и передачи точного времени.

Таблица 1.2 – Погрешности прогнозирования эфемерид НКА ГЛОНАСС (по радиус-вектору dR , вдоль орбиты dL , по бинормали dN и в проекции на дальность dRe)

| Интервал прогноза | МО [м] | | | СКО [м] | | | dRe [м] ($P=0,67$) |
|-------------------|--------|-------|------|---------|-------|------|---------------------------|
| | dR | dL | dN | dR | dL | dN | |
| на 15 часов | 0,3 | 1,8 | 0,9 | 0,1 | 1,9 | 0,5 | 0,48 |
| на 30 суток | 2,8 | 345,2 | 1,5 | 1,8 | 273,4 | 0,7 | 71,08 |

Проведя анализ данных таблиц 1.1, 1.2, можно сказать, что для выполнения требований к ЭИ НКА ГЛОНАСС, предъявленных в [22] (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), необходимы 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. Возникает актуальная задача – определение и высокоточный учет в модели движения возмущающих ускорений, вызванных радиационным давлением на корпус НКА ГЛОНАСС.

1.2. Анализ методов учета радиационных возмущений в модели движения навигационных космических аппаратов

1.2.1. Общие сведения о моделировании радиационного давления

Прямое световое давление на поверхность НКА совместно с давлением отраженной от Земли солнечной радиации составляют радиационное возмущение движения спутников. Для активных КА к ним относят и влияние собственного теплового излучения, возникающее вследствие работы бортовых систем. В отличие от сил тяготения, силы прямого радиационного давления не являются функциями одного лишь положения объекта. Кроме координат они зависят от формы объекта, его ориентации к потоку солнечной энергии, от температуры и отражательных свойств его поверхности, а также от многих других физических факторов, связанных не только со свойствами самого объекта, но и свойствами окружающей среды.

Поток солнечного излучения на определенном расстоянии практически постоянен во времени и незначительно меняется в течение одиннадцатилетнего цикла солнечной активности (0,1%) [56]. Вариации светимости Солнца, связанные со вспышками, еще менее значимы (0,01%) [56]. Суммарная энергия потока солнечного излучения, проходящего перпендикулярно через единицу площади за единицу времени на расстоянии одной астрономической единицы (A_e) от Солнца, называется солнечной постоянной, усредненное значение которой $E_0 = 1361 \text{ Вт/м}^2$ [47]. Величина потока излучения убывает с квадратом расстояния до Солнца.

Импульс единичного фотона p связан с его энергией E выражением:

$$E = c \cdot p, \quad (1.1)$$

где c — скорость света.

Следовательно, давление потока на абсолютно черную пластину, расположенную перпендикулярно к нему на расстоянии r от Солнца, равно изменению потока импульса за единицу времени:

$$P = \frac{E_0}{c} \left(\frac{A_e}{r} \right)^2. \quad (1.2)$$

Характеристикой, которая полностью описывает радиационное давление на элемент поверхности, является индикатриса рассеяния света [13]. Следует отметить, что индикатриса, необходимая для определения величины светового давления, в практике баллистического обеспечения полета КА практически никогда неизвестна для поверхности спутников сложной формы. Поэтому для вычисления возмущающих ускорений строится приближенная математическая модель воздействия сил радиации, при которой падающий поток разбивается на три составляющие излучения [25,45,48]:

- поглощенную;
- отраженную зеркально;
- отраженную диффузно.

Под диффузным (ламбертовым) отражением понимается отражение по закону косинусов Ламберта [42]. Рассмотрим плоскую поверхность площади S и единичным вектором нормали \vec{n} , на которую в направлении $\vec{\tau}$ падает свет. Предположим, что поверхность обладает коэффициентом зеркального отражения k_z и диффузного отражения k_d . Тогда $1 - k_z - k_d$ всего потока поглощается поверхностью. Используя (1.2), запишем выражения для сил давления различных составляющих падающего света: поглощенного (1.3), зеркально отраженного (1.4) и диффузно отраженного (1.5).

$$F_0 = PS \cdot (1 - k_z - k_d) \cos \alpha \cdot \vec{\tau}, \quad (1.3)$$

$$F_z = PS \cdot 2k_z \cos^2 \alpha \cdot (-\vec{n}), \quad (1.4)$$

$$F_d = PS \cdot k_d \cos \alpha \cdot \left(\vec{\tau} - \frac{2}{3} \cdot \vec{n} \right), \quad (1.5)$$

где:

$$P = \frac{E_0}{c} \left(\frac{A_e}{r} \right)^2.$$

Возмущающее ускорение от светового давления, действующего на аппарат, поверхность которого состоит из N плоских элементов, представляется в виде:

$$\mathbf{g}_{pad} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^N \eta_i F_{pad}^{(i)}(S_i, \alpha_i, k_{di}, k_{zi}), \quad (1.6)$$

где m – масса аппарата;

η_i – функция освещенности элемента, равная нулю, если элемент находится в тени, единице при полном освещении Солнцем, и промежуточной величине, если НКА находится в полутени или элемент освещен не полностью;

S_i – площадь элемента;

α_i – угол падения света на элемент;

k_{di} – коэффициент диффузного отражения элемента;

k_{zi} – коэффициент зеркального отражения элемента.

На практике удобнее разделить все элементы поверхности объекта на l групп, каждая из которых обладает своим набором коэффициентов k_{dj} и k_{zj} . Суммарное количество параметров, описывающих отражающую способность всей поверхности объекта, в этом случае будет равно $2l$. Ускорение, обусловленное световым давлением, записывается в виде:

$$\vec{g}_{\text{рад}} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^l \left[(1 - k_{zj} - k_{dj}) F_0^j + 2k_{zj} F_z^j + k_{dj} F_d^j \right]. \quad (1.7)$$

Входящие в (1.7) силы F_0^j, F_z^j, F_d^j описываются выражениями:

$$F_0^j = \sum_{i \in Q_j} \eta_i F_0(S_i, \alpha_i, k_z = 0, k_d = 0),$$

$$F_z^j = \sum_{i \in Q_j} \eta_i F_z(S_i, \alpha_i, k_z = 1),$$

$$F_d^j = \sum_{i \in Q_j} \eta_i F_d(S_i, \alpha_i, k_d = 1),$$

где Q_j – индексное множество элементов, входящих в j -ю группу, а функции под знаком суммы соответствуют выражениям (1.3 – 1.5).

1.2.2. Простейшая модель радиационного давления

История учета сил светового давления на движение искусственных спутников Земли достаточно коротка [7,29,40]. Учет формы и свойств поверхности КА встречается достаточно редко, в подавляющем большинстве случаев дело ограничивается использованием так называемого коэффициента

светового давления, согласуемого по измерениям текущих навигационных параметров (далее – измерения).

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, выражалось в долях солнечного притяжения через коэффициент светового давления (КСД) κ [1]:

$$\vec{g}_{\text{рад}} = -\kappa \mu_{\odot} \frac{\vec{r}_{\odot}}{r_{\odot}^3}, \quad (1.8)$$

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

Наиболее просто радиационное давление и коэффициент κ выражается для сферического спутника [1]:

$$\vec{g}_{\text{рад}} = -E_0 \frac{A_e^2 \pi R^2}{r_{\odot}^2 mc} (1 + 0,44k_d) \frac{\vec{r}_{\odot}}{r_{\odot}}, \quad (1.9)$$

$$\kappa = E_0 \frac{A_e^2 S}{\mu_{\odot} mc} (1 + 0,44k_d),$$

где E_0 – солнечная энергетическая постоянная (удельная мощность излучения на расстоянии 1 а.е. от Солнца), равная 1361 Вт/м² [47];

A_e – астрономическая единица;

c – скорость света в вакууме;

m – масса спутника;

k_d – коэффициент диффузного отражения поверхности КА.

Выражение (1.9) получено в предположении, что отражательные характеристики одинаковы по всей поверхности сферического КА.

1.2.3. Методы учета радиационных возмущений, применяемые в ЭО ГЛОНАСС

НКА ГЛОНАСС любой модификации представляет собой тело сложной невыпуклой формы (рисунок 1.1) [52], значительных геометрических размеров

(панели солнечных батарей), с активной СОС, а также собственным тепловым излучением вследствие работы бортовых систем, регулируемым 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 1.1 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 СОЗ вдоль оси привода панелей солнечных батарей, ось Ox_3 дополняет систему до правой.

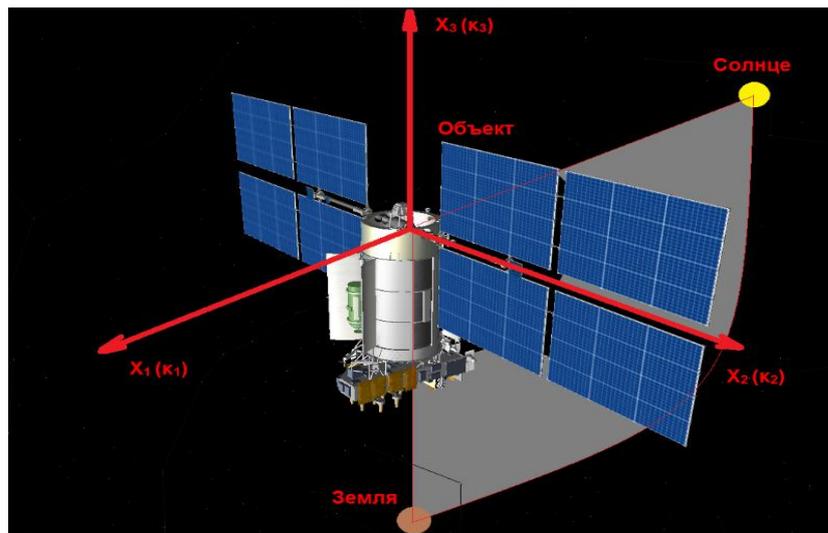


Рисунок 1.1 – Модель НКА «Глонасс-М» и НПССК

Как и в случае с простейшей одномерной моделью (1.8), вводятся безразмерные коэффициенты светового давления κ_1 , κ_2 , κ_3 для каждой составляющей возмущения. Проекция ускорения на оси НПССК НКА ГЛОНАСС от радиационного давления выражаются в виде:

$$g_{\text{рад}}^i = \kappa_i \frac{\mu_{\odot}}{r_{\odot}^2}, \quad i=1,2,3, \quad (1.10)$$

где μ_{\odot} – гравитационный параметр Солнца;

r_{\odot} – расстояние от НКА до Солнца;

k_i – коэффициент светового давления в соответствующем направлении НПССК.

Общий подход к построению модели радиационного давления КА произвольной формы следующий [7]. Поверхность КА разбивается на несколько элементарных поверхностей, для каждой элементарной плоской поверхности определяется ее ориентация относительно падающего излучения и рассчитывается возмущающее ускорение по формуле [1]:

$$\vec{g}_{\text{рад}} = J \frac{S}{mc} |\cos \alpha| \cdot \left[\text{sign}(\cos \alpha) \cdot \left(2|\cos \alpha| k_z + \frac{2}{3} k_d \right) \cdot \vec{n} + (1 - k_z) \cdot \vec{\tau} \right], \quad (1.11)$$

где J – поток радиации, падающий на поверхность;

S – площадь поверхности;

m – масса КА;

c – скорость света;

\vec{n} – орт (единичный вектор) нормали к поверхности;

$\vec{\tau}$ – орт направления падающего излучения;

$\cos \alpha = (\vec{n}, \vec{\tau})$ – косинус угла, образованный ортами \vec{n} и $\vec{\tau}$;

k_z и k_d – соответственно коэффициенты зеркального и диффузного отражения рассматриваемой поверхности, для которых, с учетом коэффициента поглощения k_p , справедливо соотношение $k_z + k_d + k_p = 1$.

Однако такой простой подход при его реализации связан с рядом трудностей, а именно: с выбором разбиения (большое число поверхностей); расчетом ориентации каждой поверхности (неопределенность ориентации НКА, необходимость учета затенения); неточностью знания отражательных характеристик каждой поверхности и т.д.

Первая модель радиационного давления (МСД-1) [7] НКА модификации «Глонасс» была одномерной, то есть описывала радиационное возмущение по одному направлению – солнечного излучения (ось Ox_1). 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 (κ_1).

Вторая модель радиационного давления (МСД-2) [7] НКА модификации «Глонасс» была двухмерной (плоской), то есть описывала радиационное возмущение по двум составляющим: по направлению солнечного излучения (ось Ox_1) и перпендикулярно ему в плоскости Солнце – объект – Земля (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 (κ_1).

Очередной этап повышения точностных характеристик ГЛОНАСС потребовал пересмотреть подход к моделированию светового давления НКА модификации «Глонасс». По результатам эфемеридного обеспечения ГЛОНАСС было установлено, что МСД-2 имеет высокий уровень немоделируемых ускорений, главной причиной которого являлось отсутствие учета возмущений по нормали к плоскости СОЗ. Эмпирическим путем было установлено, что нормальное к плоскости СОЗ (см. рис.1.1) возмущение составляло величину $\kappa_2 \sim 0,4 \cdot 10^{-7}$ (в долях гравитационного притяжения Солнца в соответствии с (1.10)). Необходимо заметить, что ошибки прогнозирования наиболее чувствительны именно к составляющей по нормали к плоскости СОЗ. Именно хорошая наблюдаемость по измерениям коэффициента κ_2 предопределила создание модели нового вида, которая учитывала бы эмпирические (согласуемые по измерениям) ускорения. Получить аналитические соотношения для согласуемых ускорений не представлялось возможным ввиду неясности и

неопределенности их физического объяснения. Так, например, ненулевое значение коэффициента k_2 предположительно объясняется асимметрией собственного теплового излучения НКА модификации «Глонасс», поскольку створки радиаторов системы терморегулирования, расположенных симметрично для взаимной компенсации, с одной стороны находились постоянно в закрытом положении. Однако аналитически определить величину возникающего при этом возмущения не представлялось возможным. Поэтому для учета данного эффекта использовалось эмпирическое значение, полученное по измерениям. Таким образом, началась разработка следующей модификации модели светового давления (МРД-3) [7], принципиальное отличие которой было в моделировании трехмерного вектора возмущающего ускорения.

Был применен комплексный метод решения проблемы снижения немоделируемых ускорений, ибо локальные мероприятия уже не приносили сколь заметного результата. Суть комплексного подхода заключалась в проведении ряда мероприятий, таких как:

- проведение практического эксперимента по замеру оптических характеристик поверхности НКА модификации «Глонасс» (панели Солнечных батарей, теплоизоляционная пленка корпуса НКА и т.д.);

- проведение детального описания конструкции НКА с замером в натуральных условиях размеров и расположения всех сколь-нибудь значимых элементов конструкции;

- моделирование работы системы ориентации и стабилизации НКА модификации «Глонасс» с учетом особенности ее работы на теневых и других переходных участках;

- создание стохастической имитационной модели облучения НКА с учетом взаимного затенения и переотражения радиации;

- создание программно-методического аппарата апостериорного согласования и коррекции параметров модели радиационного давления.

Замер оптических характеристик поверхности НКА, в первую очередь ПСБ, позволил с высокой точностью описать возмущающее воздействие излучения. Впоследствии, косвенным путем была подтверждена высокая точность и достоверность полученных значений оптических коэффициентов. Детальное описание конструкции НКА стало наиболее трудоемкой частью создания очередной модификации модели радиационного давления НКА модификации «Глонасс». Был проведен обмер множества элементов конструкции, таких как ПСБ, цилиндр корпуса, жалюзи СТР, блок антенно-фидерного устройства (АФУ), штанга магнитометра, навесное оборудование, навигационная и приемопередающие антенны командной измерительной станция (КИС) и др. Основной прорыв в части точности моделирования радиационного давления был связан с моделированием работы системы ориентации и стабилизации. Используя измеренные оптические характеристики, подробное описание поверхности НКА и работы СОС, была создана стохастическая имитационная модель облучения НКА. Моделировалось движение фотона, который с заданной вероятностью попадал на поверхность НКА, далее поглощался либо отражался (диффузно или зеркально). Отраженный фотон из-за невыпуклой формы НКА мог снова попасть на другой элемент поверхности (переотражение) и т.д. Методом статистических испытаний [24] определялось результирующее возмущение НКА, которое представлялось в виде таблиц в зависимости от углов ориентации. Расчет возмущений осуществлялся путем интерполяции данных таблиц. Разработанная таким образом модель радиационного давления НКА обладала очень высокой точностью, составлявшую менее 2% от величины полного возмущения [7]. В дальнейшем физическая модель, построенная с использованием исходных данных об объекте, получила название априорной. Дополнительно, кроме учета давления на корпус и ПСБ НКА, учета номинальной работы СОС и СТР, также была включена эмпирическая функция, которая описывает наблюдаемую на всех объектах системы симметричную относительно центров теневых сезонов, и имеющую полугодовой период, сезонную составляющую в трансверсальном ускорении («теневой горб»). Однако имел место значительный разброс амплитуд «теневого

горба» у разных КА. Это указывает на конструктивную причину этого эффекта, например, на возможность усиливающегося к центру теневых сезонов запаздывания СОС, не успевающей обрабатывать требуемые большие скорости в канале рыскания.

Разработанная в ходе перечисленных мероприятий модель получила название МРД-3 [7]. Впоследствии МРД-3 была дополнена учетом влияния отраженного от Земли излучения и теплового излучения Земли [40].

Можно выделить следующие основные аспекты разработанной в период 1990 – 1992 гг. МРД-3 НКА модификации «Глонасс» [7]:

– учитываются три составляющих ускорения от радиационного давления вдоль осей НПССК: Солнце – объект (κ_1), нормаль к плоскости СОЗ (κ_2), направление, которое вместе с перечисленными направлениями дополняет систему координат до правой (κ_3). Указанные составляющие ускорения от радиационного давления нормированы значением ускорения от гравитационного притяжения Солнца и учитываются при помощи безразмерных коэффициентов светового давления κ_1 , κ_2 , κ_3 ;

– значения коэффициентов κ_1 , κ_2 , κ_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 (κ_1), по нормали к направлению Солнце – объект в плоскости СОЗ (κ_3)).

Для оценки точности МРД-3 использовались разности параметров месячного прогноза от параметров орбиты на мерном интервале. Такой подход применялся для того, чтобы отделить погрешности модели от погрешностей определения параметров орбиты, которые доминируют на коротких интервалах прогноза. Исследования показали, что ошибки 30-суточного прогноза составляли: вдоль орбиты – 1000...1500 м, по радиус-вектору – до 50 м [7].

В дальнейшем на НКА модификации «Глонасс», а также НКА модификации «Глонасс-М» были применены элементы новых ПСБ. В результате изменения оптических характеристик ПСБ, погрешности априорной модели радиационного давления МРД-3 выросли до 6%...7%. Тем не менее, использование согласуемых параметров позволило удержать общие характеристики на прежнем уровне. Для модернизированного НКА «Глонасс» использовалась МРД-3 с минимальными доработками. При этом уровень немоделируемых возмущений остался на прежнем уровне. Для НКА «Глонасс-М» была создана новая модель радиационного давления. 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.

Увеличение площади ПСБ при одинаковой массе объектов вызывало пропорциональное увеличение радиационных возмущений. Использование характеристик для ПСБ НКА типа «Глонасс» до модификации, вызвало пропорциональное увеличение погрешностей априорной МРД. 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. В совокупности возмущения от малых элементов не превышают погрешности, обусловленной неопределенностью оптических характеристик и параметров ориентации. Кроме того, устанавливаемая на отдельных НКА бортовая аппаратура межспутниковых измерений (БАМИ), межспутниковая лазерная навигационно-связная система (МЛНСС), другое навесное оборудование [52] делает создание высокоточной априорной МРД «под каждый НКА» проблематичной и нецелесообразной. Поэтому при создании априорной МРД «Глонасс-М» был ограничен состав учитываемых поверхностей – ПСБ, цилиндр корпуса, блок АФУ, жалюзи СТР. Для компенсации остаточных НМУ использовались три согласуемых параметра (по направлению Солнце – объект (κ_1), по нормали к плоскости СОЗ (κ_2), по нормали к направлению Солнце – объект в плоскости СОЗ (κ_3)).

В таблице 1.3 приведены характеристики моделей радиационного давления, разработанных для эфемеридного обеспечения ГЛОНАСС.

Таблица 1.3 – 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 |

Проведя анализ данных таблицы 1.3, можно сделать следующий вывод, 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% [7], что стало пределом. Дальнейшее совершенствование априорной модели уже не приводило к снижению НМУ. Достоверно определить, что за наблюдаемое отличие реального движения от моделируемого априорной МРД отвечает тот или иной физический параметр, было практически невозможно. Вследствие этого, 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 (κ_1 , κ_2 , κ_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).

По результатам 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 (κ_1 , κ_2 , κ_3)

определялись амплитуды и фазы возмущений, которые потом учитывались при моделировании движения.

Необходимо отметить, что такой 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 [29]:

$$\Delta\kappa_i = A_0^{(i)}, \quad (1.12)$$

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

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

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 [8]:

$$\begin{aligned} \Delta\kappa_1 &= A_0^{(1)} + 2A_1^{(1)} \sin \alpha, \\ \Delta\kappa_2 &= A_0^{(2)} + A_1^{(2)} \sin \alpha, \\ \Delta\kappa_3 &= A_0^{(3)} + A_1^{(3)} \cos 2\gamma, \end{aligned} \quad (1.13)$$

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

γ – склонение Солнца к плоскости орбиты;

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

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

Приведенные согласующие МРД позволили 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 [38].

Таким образом, можно сказать, что в настоящее время модель радиационного давления НКА ГЛОНАСС (модификации «Глонасс», «Глонасс-М») учитывает влияние следующих групп факторов:

- прямого солнечного излучения;
- затенения объекта Землей или Луной с учетом полутеневых эффектов;
- отраженной от Земли солнечной радиации и теплового излучения Земли, включая их широтно-сезонные вариации;
- геометрических и оптических характеристик поверхности КА;
- алгоритма работы системы ориентации и стабилизации;
- собственного теплового излучения КА;
- индивидуальных особенностей каждого объекта навигационной системы.

Первые три группы факторов не привязаны к конкретному НКА. Источники внешнего излучения рассматриваются как точечные и бесконечно удаленные. Данное утверждение с достаточной точностью справедливо для солнечной радиации, однако лишь приближенно применимо к отраженному и тепловому излучениям Земли, суммарное влияние которых в ~50 раз меньше, чем влияние Солнечной радиации [40]. Будем пренебрегать спектральными характеристиками возмущающих излучений и рассматривать лишь влияние интегрального потока радиации. Соответственно при определении давления излучения на поверхность НКА используется диффузно-зеркальная схема отражения (вместо учета индикатрисы рассеивания) (раздел 1.2.1). Следующие три группы факторов определяют априорную МРД НКА конкретной модификации (различия между однотипными НКА группировки ГЛОНАСС не учитываются). И, наконец, последний фактор определяет согласующую МРД конкретного НКА, которая позволяет учитывать различия между однотипными НКА группировки, выявляющиеся уже на этапе летной эксплуатации. В соответствии с проведенными исследованиями, совершенствование согласующей МРД является наиболее перспективным путем повышения точности эфемеридного обеспечения.

Итак, по результатам анализа можно сказать, что рассмотренные 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 [22]. 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.

1.2.4. Методы учета радиационных возмущений, применяемые для зарубежных глобальных навигационных систем

Многими учеными проводились исследования по разработке высокоточной модели радиационного давления для спутников GPS [43,44,45, 46,48,50,51,52,53,54,56,57,58].

Для компенсации эффектов радиационного давления, различные международные центры анализа (IGS, CODE, IAC) применяют ряд моделей, которые можно разделить на две группы:

- эмпирические модели;
- априорные модели.

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).

Рассмотрим некоторые эмпирические модели НКА GPS. Одна из первых попыток компенсации НМУ за счет сил, действующих на НКА GPS, была сделана Коломбо (1989): «Аналитическая теория возмущения орбиты предполагает, что ошибки эфемерид спутников GPS, должны быть обусловлены, главным образом, резонансными эффектами и могут быть исправлены коррекцией нескольких параметров в простой эмпирической формуле ускорения, несмотря на их происхождение (немоделируемые возмущения силы притяжения, радиационного давления, и т.д.), по крайней мере, для пассивных орбит» [54]. Модель Коломбо

рассматривает гравитационное поле Земли как главный источник ошибок орбит НКА GPS. Поэтому в ней нет явной зависимости от положения Солнца относительно спутника. В [54] описаны расширенные методы моделирования орбит, используемые в Center for Orbit Determination in Europe (CODE). Для компенсации прямого давления солнечного излучения, действующего на спутники и уточняемого по измерениям, оцениваются до девяти эмпирических параметров в системе координат DYB , связанной с НКА. Ориентация системы координат следующая: направление D – нормаль к солнечным батареям, направление Y – вдоль оси панелей солнечных батарей НКА и направление B дополняет систему до правой (при этом направление B не соответствует ориентации корпуса спутника):

$$\begin{aligned} D(u) &= D_0 + D_c \cos u + D_s \sin u, \\ Y(u) &= Y_0 + Y_c \cos u + Y_s \sin u, \\ B(u) &= B_0 + B_c \cos u + B_s \sin u. \end{aligned} \tag{1.14}$$

Аргументом модели является аргумент широты НКА (u), который непосредственно не связан с относительным положением спутника относительно Солнца. Дополнительно модель (1.14) может учитывать априорную информацию, например, данные априорной модели ROCK [44, 45]. В CODE была проведена доработка описанной модели. После проведения модификации модель стала более адекватно описывать действие радиационного давления на НКА GPS [54] и позволила сократить число уточняемых параметров орбиты. Она была получена с использованием в качестве измерений прецизионных эфемерид НКА GPS, определенных CODE на интервале нескольких лет. Модель имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} D &= D_0, \\ Y &= Y_0, \\ B &= B_0, \\ Z(\alpha) &= Z_1 \sin \alpha, \end{aligned} \tag{1.15}$$

$$X(\alpha) = X_1 \sin \alpha + X_3 \sin 3\alpha.$$

Модель имеет шесть основных параметров. Два дополнительных направления Z и X , которые соответствуют поверхностям спутника, освещенным Солнцем (Z – по направлению Объект – Земля, X – дополняет систему координат XYZ до правой). Аргумент модели – геоцентрический угол, отсчитываемый в плоскости орбиты от направления на НКА до проекции направления на Солнце (α). В настоящее время CODE использует версию этой модели для определения прецизионных параметров орбит НКА GPS. IGS оценивает пять параметров модели (1.14) (D_0 , Y_0 , B_0 , B_c и B_s). Подход, который использован в [54], но с другой параметризацией, был применен при разработке модели НКА GPS GSPM. В качестве исходных данных были использованы прецизионные эфемериды НКА GPS, определённые в Jet Propulsion Laboratory (JPL) на интервале нескольких лет [43]. Модель GSPM представлена в виде совокупности априорного ускорения и уточняемых по прецизионной ЭИ параметрам. Вид модели:

$$\begin{aligned} X(\varepsilon) &= X_1 \sin \varepsilon + X_2 \sin 2\varepsilon + X_3 \sin 3\varepsilon + X_5 \sin 5\varepsilon + X_7 \sin 7\varepsilon, \\ Y(\varepsilon) &= Y_1 \cos \varepsilon + Y_2 \cos 2\varepsilon, \\ Z(\varepsilon) &= Z_1 \cos \varepsilon + Z_3 \cos 3\varepsilon + X_5 \cos 5\varepsilon. \end{aligned} \quad (1.16)$$

Аргументом модели является угол ε (Солнце – Объект – Земля). Угол ε совместно с ортами системы координат XYZ содержит полную информацию о номинальной ориентации спутника:

$$\cos \varepsilon = -\cos \gamma \cos \alpha, \quad (1.17)$$

где γ – склонение Солнца к плоскости орбиты;

α – геоцентрический угол, отсчитываемый в плоскости орбиты от направления на НКА до проекции направления на Солнце.

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.

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.

Рассмотрим некоторые априорные МРД НКА GPS, доступные в открытых публикациях. Априорные модели давления солнечного излучения разрабатывались с учетом конструкции спутников (элементы корпуса и ПСБ НКА, затенение и эффекты переотражения между ними) с известными оптическими характеристиками и учетом физического взаимодействия радиации с поверхностями спутников. Также учитывалась номинальная ориентация НКА. Эти модели основывались на информации производителей спутников. Первыми априорными моделями для спутников с модификациями Block I и Block II/IIA GPS были модели ROCK4 и ROCK42, разработанные производителем спутников Rockwell International и IBM. Эти модели были улучшены в работе [45] аппроксимацией простым рядом Фурье в зависимости от угла СОЗ (1.17). Данные модели получили название T10 и T20, соответственно. В работе [44] был использован тот же подход для разработки модели T30 для спутников GPS с модификацией Block IIR, основываясь на детальном данных производителя спутников Martin Marietta. В более поздней работе [50] авторы разработали улучшенную априорную модель радиационного давления для спутников GPS с модификацией Block IIR. В работе [58] можно также встретить точные модели для неконсервативных сил. Описанные в [58] модели учитывают больше эффектов по сравнению с моделями T20 и T30, например, затенение и переотражение между поверхностями.

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. [43].

В ряде разработанных моделей для НКА GPS отдельно стоит отметить подход, аналогичный применяемому в ЭО ГЛОНАСС, например, для формирования МРД «Глонасс-М». Базируясь на преимуществах и недостатках рассмотренных моделей, модель *box-wing* была разработана на основании физического взаимодействия прямого солнечного излучения и спутника, состоящего из корпуса и солнечных батарей [56]. При разработке модели *box-wing* были сделаны следующие предположения:

- конструкция спутника может быть упрощена до корпуса и панелей солнечных батарей;
- небольшие элементы конструкции (например, антенны или двигатели) не рассматриваются;
- не рассматривается затенение или эффекты переотражения поверхностей;
- тепловое излучение из-за работы бортовых систем не рассматривается;
- поглощенная радиация предполагается немедленно повторно-излученной, поэтому эффекты нагревания и охлаждения не рассматриваются;
- излучение Солнца и масса спутника известны.

При этом некоторые из параметров модели *box-wing* могут быть уточнены по данными измерений НКА GPS (оптические характеристики соответствующих поверхностей спутника).

Для НКА Galileo и Beidou применяются аналогичные с НКА GPS подходы к построению МРД. Например, априорная модель может быть построена на основе исследований [57] с применением исходных данных и оптических характеристик поверхностей соответствующих объектов.

Анализируя развитие МРД НКА GPS, можно отметить аналогичную с НКА ГЛОНАСС тенденцию 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 [56].

Общим недостатком моделей, описанных в п. 1.2.4, 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.

1.3. Исходные данные и постановка задачи

1.3.1. Анализ исходных данных

Как указано выше, на текущий момент в МРД аппаратов модификации «Глонасс-М» и «Глонасс-К» ускорение от радиационного давления учитывается с использованием трех составляющих в НПССК. Ускорение от радиационного давления нормировано значением ускорения от гравитационного притяжения Солнца и выражается через безразмерные коэффициенты светового давления κ_1 , κ_2 , κ_3 в соответствующих направлениях НПССК:

$$\vec{g}_{\text{рад}} = \frac{\mu_{\odot}}{r_{\odot}^2} \sum_{j=1}^3 \kappa_j \vec{i}_j, \quad (1.18)$$

где μ_{\odot} – гравитационный параметр Солнца;

r_{\odot} – радиус-вектор Солнца;

\vec{i}_i – орты НПССК:

$\vec{i}_1 = \frac{\vec{r}_{\odot}}{r_{\odot}}$ – по направлению солнечной радиации (Солнце – объект);

$\vec{i}_2 = \frac{\vec{i}_1 \times \vec{r}}{|\vec{i}_1 \times \vec{r}|}$ – по нормали к плоскости СОЗ;

$\vec{i}_3 = \vec{i}_1 \times \vec{i}_2$ – дополняет систему до правой (по нормали к направлению Солнце – объект в плоскости СОЗ).

Наличие заметных погрешностей учета сил радиационного давления в математической модели движения НКА ГЛОНАСС приводит к необходимости включения в состав МД эмпирической согласующей модели, параметры которой уточняются по измерениям. Для согласования параметров используется измерительная информация текущих навигационных параметров (первичные измерения) или прецизионная ЭИ (вторичные измерения). Например, в эфемеридном обеспечении ГЛОНАСС при определении параметров движения на мерном интервале используются согласующие параметры, характеризующие проекции НМУ на оси НПССК – постоянные на мерном интервале коэффициенты светового давления ($\kappa_1, \kappa_2, \kappa_3$) (1.18).

Для минимизации погрешностей, связанных с ошибками измерений, возможны следующие подходы:

- использование высокоточных измерений текущих навигационных параметров (фазовых измерений международной сети БИС IGS, квантово-оптических измерений международной сети квантово-оптических систем (КОС) ILRS);

- использование прецизионной ЭИ НКА, определяемой по глобальной сети БИС в режиме апостериорной обработки (СВОЭВП). Погрешность указанной ЭИ находится на сантиметровом уровне [15].

В первом случае в вектор уточняемых параметров при определении параметров орбит НКА включаются коэффициенты МРД по осям НПССК. Состав коэффициентов может варьироваться в зависимости от прохождения НКА «тневых» участков, когда в состав уточняемых параметров включается ускорение в направлении трансверсали к орбите, а коэффициент κ_2 не уточняется. В качестве ИТНП выступают кодовые и фазовые беззапросные измерения.

Во втором случае в качестве измерительной информации используются прецизионные эфемериды НКА, а вектор уточняемых параметров представляет

собой только коэффициенты МРД по осям НПССК. С использованием указанных исходных данных решается задача согласования коэффициентов МРД.

Ниже на рисунках 1.3 – 1.9 приведены результаты уточнения коэффициентов существующей МРД в контуре СВОЭВП для двух указанных вариантов на интервале 01.01.2013 – 01.01.2017 (значения коэффициентов на графиках увеличены в 10^7 раз). Представлены графики изменения поправок к коэффициентам МРД для НКА модификации «Глонасс-М» из различных орбитальных плоскостей, принадлежащих разным производственным сериям.

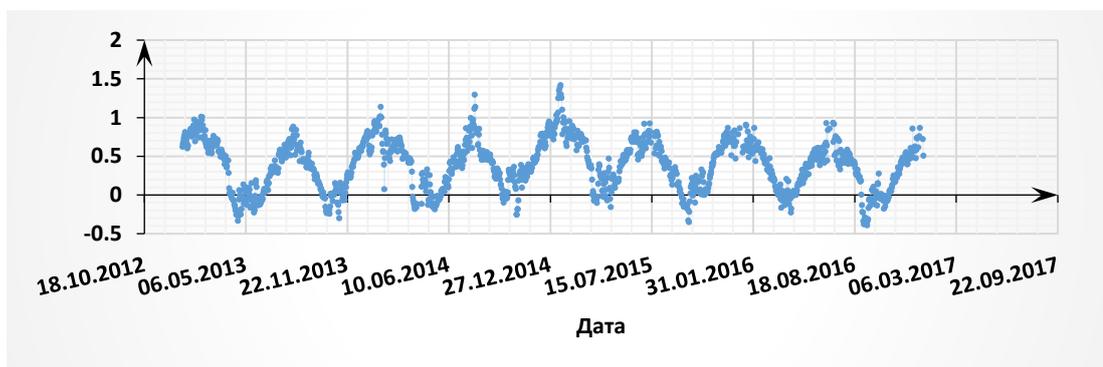


Рисунок 1.2 – Эволюция поправки к коэффициенту k_1 МРД в направлении Солнце – объект для НКА R01 (1-я орбитальная плоскость), уточненной по фазовым измерениям глобальной сети БИС

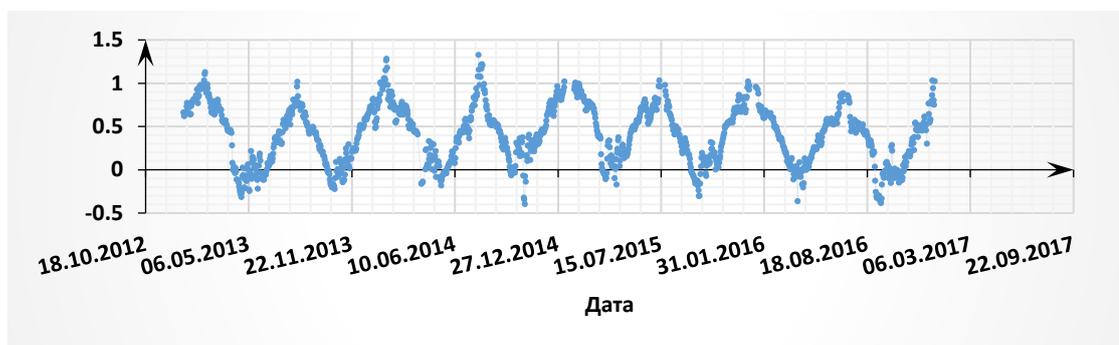


Рисунок 1.3 – Эволюция поправки к коэффициенту k_1 МРД в направлении Солнце – объект для НКА R01 (1-я орбитальная плоскость), уточненной по прецизионной ЭИ

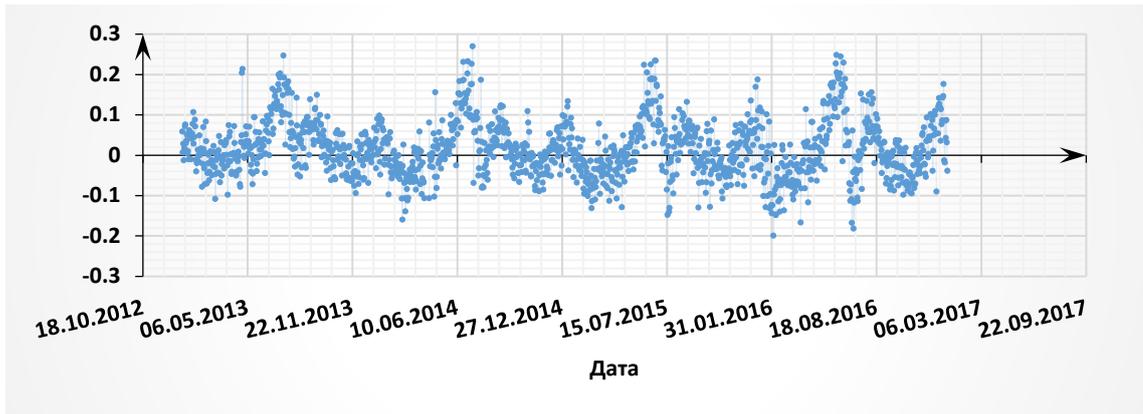


Рисунок 1.4 – Эволюция поправки к коэффициенту k_3 МРД для НКА R01 (1-я орбитальная плоскость), уточненной по фазовым измерениям глобальной сети БИС

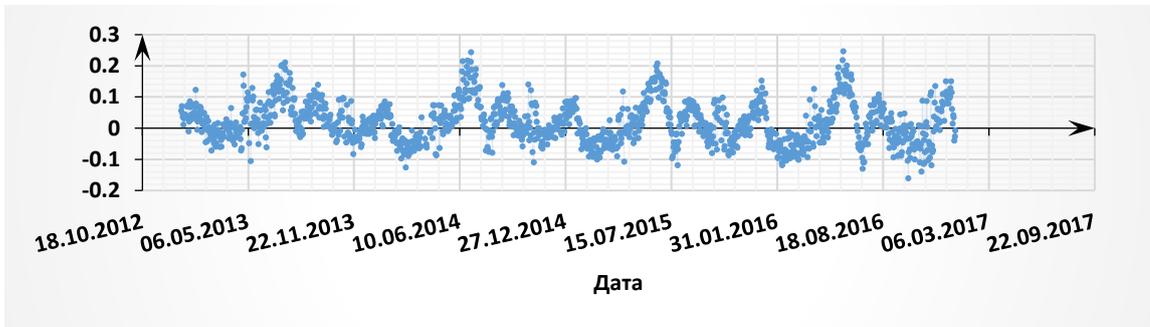


Рисунок 1.5 – Эволюция поправки к коэффициенту k_3 МРД для НКА R01 (1-я орбитальная плоскость), уточненной по прецизионной ЭИ

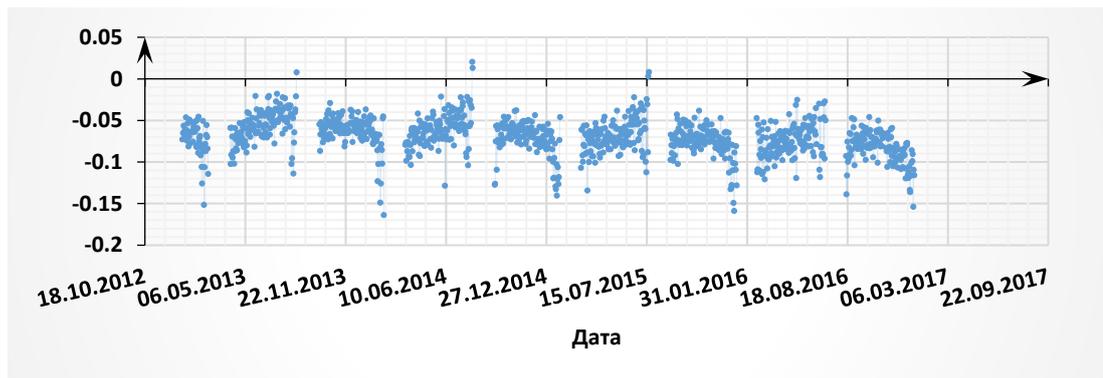


Рисунок 1.6 – Эволюция поправки к коэффициенту k_2 МРД в направлении нормали к плоскости СОЗ для НКА R10 (2-я орбитальная плоскость), уточненной по фазовым измерениям глобальной сети БИС

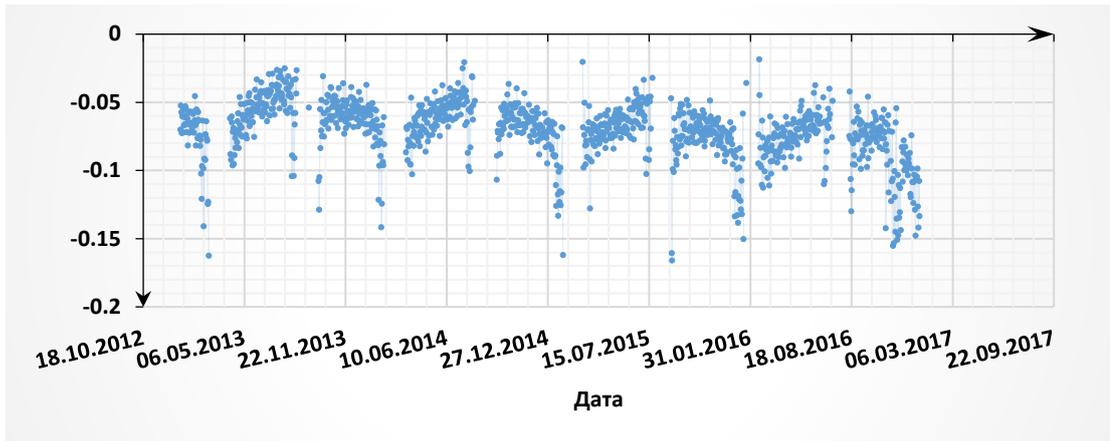


Рисунок 1.7 – Эволюция поправки к коэффициенту k_2 МРД в направлении нормали к плоскости СОЗ для НКА R10 (2-я орбитальная плоскость), уточненной по прецизионной ЭИ

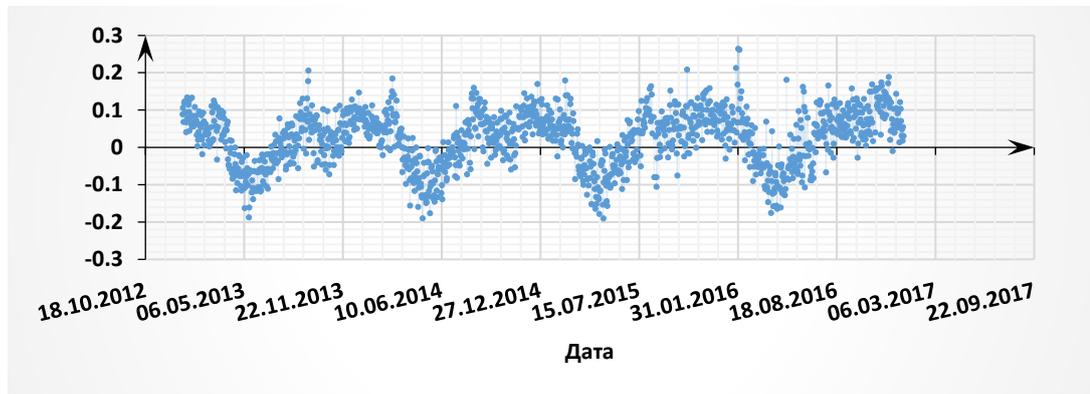


Рисунок 1.8 – Эволюция поправки к коэффициенту k_3 МРД для НКА R10 (2-я орбитальная плоскость), уточненной по фазовым измерениям глобальной сети БИС

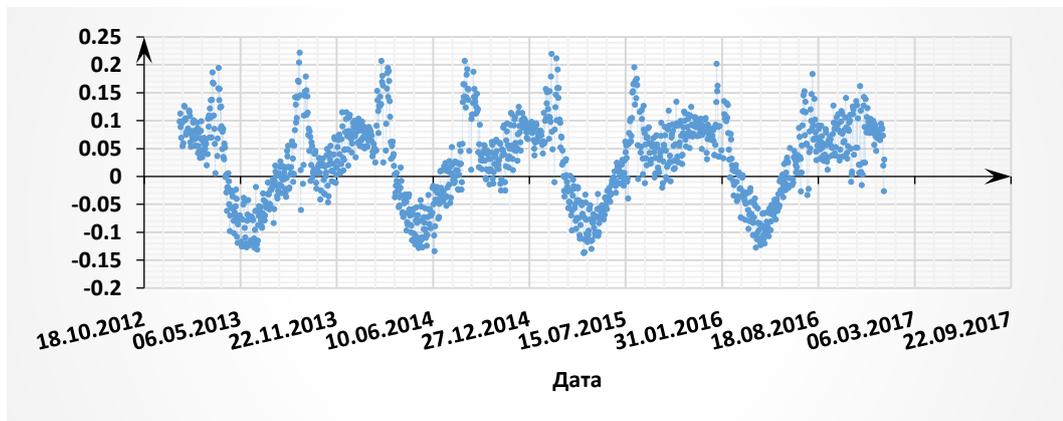


Рисунок 1.9 – Эволюция поправки к коэффициенту k_3 МРД для НКА R10 (2-я орбитальная плоскость), уточненной по прецизионной ЭИ

Из анализа графиков можно сделать следующие выводы:

– на графиках изменения поправки для каждого коэффициента модели присутствует не только случайная, но и детерминированная периодическая составляющая;

– характер поведения поправок к коэффициентам МРД имеет индивидуальные особенности для каждого НКА и коэффициента модели.

Таким образом, наличие детерминированной составляющей позволяет построить эмпирическую модель поведения коэффициентов (согласующую модель радиационного давления), аргументами которой являются параметры, связанные с основными периодами радиационных возмущений. Ввиду отличий поведения коэффициентов для различных НКА, значения параметров данной согласующей МРД должны уточняться индивидуально для каждого объекта.

1.3.2. Постановка задачи

Примем в качестве объекта исследований для анализа возмущений РД выборку значений поправок к коэффициентам априорной МРД по осям НПССК ($\kappa_1, \kappa_2, \kappa_3$), которые были получены в процессе ежесуточного определения параметров движения НКА по измерительной информации, либо согласованы по прецизионной ЭИ НКА.

В общем случае задачу исследований можно представить в следующем виде:

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

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

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:

$$\Delta\kappa_i = G_i(\lambda_1, \dots, \lambda_n), i = 1, 2, 3, \quad (1.19)$$

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.

Выводы по первому разделу:

Анализ возмущений орбит НКА и факторов, определяющих погрешности их моделирования, показал, что одним из основных источников ошибок при прогнозировании эфемерид НКА ГЛОНАСС на текущий момент остается погрешность учета сил радиационного давления.

С целью решения задачи повышения точности моделирования радиационного давления, действующего на НКА ГЛОНАСС, проведен анализ методов учета радиационных возмущений, применяемых как в ЭО ГЛОНАСС, так и для системы GPS. Как следует из анализа, применение уже существующих моделей для выполнения требований, предъявленных в [22] без их принципиальной доработки невозможно.

Проанализированы основные подходы по компенсации влияния солнечной радиации на НКА – построение априорной и согласующей МРД. Показано, что затраты на построение высокоточной априорной модели могут превысить эффект от ее использования. Это обусловлено проведением большого количества трудоемких экспериментов, требуется индивидуальный подход к каждому НКА, к тому же результат непрогнозируем, так как некоторые характеристики НКА, являющиеся основой модели, с течением времени изменяются. Поэтому путь построения новой согласующей МРД является наиболее перспективным и эффективным.

Проведенные исследования на предмет определения НМУ в движении НКА ГЛОНАСС показывают, что в поведении выборок поправок к коэффициентам светового давления присутствует детерминированная составляющая, характерная для каждого коэффициента. Это позволяет построить согласующую модель радиационного давления, аргументами которой будут являться параметры, связанные с основными периодами радиационных возмущений.

По результатам проведенных исследований поставлена научная задача – разработка методики построения высокоточной согласующей МРД НКА ГЛОНАСС.

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

2.1. Вид высокоточной согласующей модели радиационного давления

В предыдущем разделе показано, что поправки к коэффициентам МРД по направлениям НПССК (Δk_i), уточняемые по ИТНП, либо по прецизионной ЭИ, имеют выраженные детерминированные периодические составляющие. Данные поправки характеризуют немоделируемую составляющую сил радиационного давления по соответствующим осям НПССК. Наличие периодических составляющих говорит о том, что присутствуют детерминированные различия между значениями, вычисляемыми с помощью МРД, и фактическими значениями ускорения, вызванного радиационным возмущением НКА. Для решения задачи выбора функциональной зависимости поведения поправок к коэффициентам светового давления рассмотрим относительное положение НКА и Солнца (рис. 2.1). 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 α, γ (рис. 2.1). Тогда выборки поправок к коэффициентам светового давления по осям НПССК можно аппроксимировать разложением в ряд по сферическим функциям [7,9]:

$$\Delta k_i = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^n \left(A_{nm}^{(i)} \cos m\alpha + B_{nm}^{(i)} \sin m\alpha \right) P_{nm}(\sin \gamma), \quad i = 1, 2, 3, n \geq m, \quad (2.1)$$

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

Δk_i – поправки к коэффициентам светового давления априорной МРД по осям НПССК, с использованием которых возмущающее ускорение от светового давления будет иметь вид (1.18);

γ – склонение Солнца к плоскости орбиты;

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

P_m – присоединенные функции Лежандра;

n – порядок разложения;

m – степень разложения.

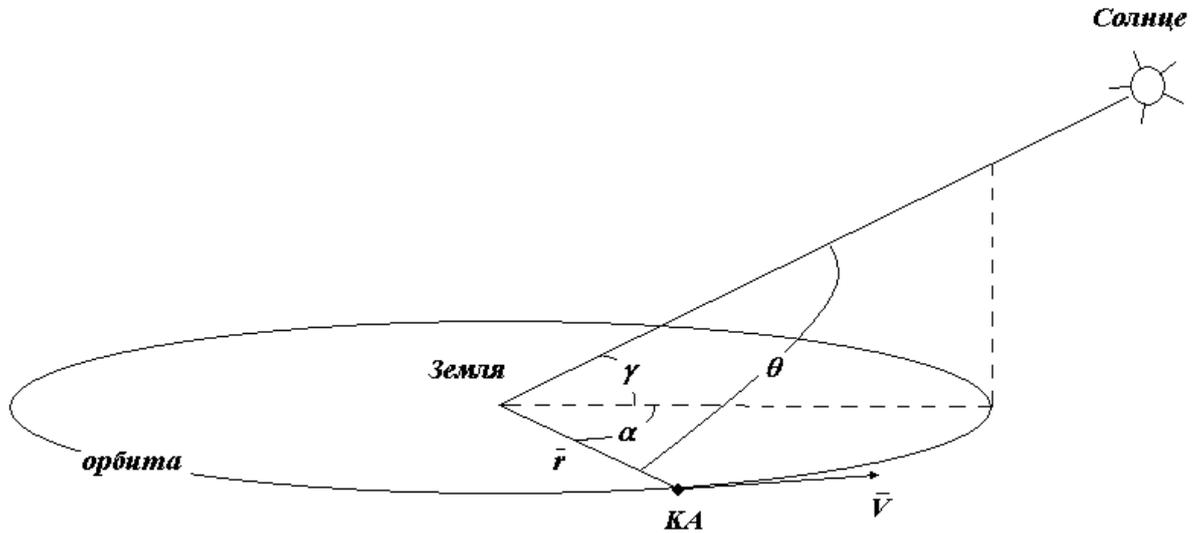


Рисунок 2.1 – Взаимное положение НКА, Земли и Солнца

Угол α определяет положение НКА в плоскости орбиты, следовательно, период изменения его значений равен времени прохождения НКА одного витка вокруг Земли. Угол γ имеет период 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 α и γ , т.е. не менее одного года.

2.2. Определение порядка и степени высокоточной согласующей модели радиационного давления

Формально модель (2.1) может иметь бесконечное число членов. Тем не менее, для ее использования в практических задачах необходимо ограничить оптимальный порядок и степень разложения. Очевидно, что увеличение количества членов ряда (2.1), с одной стороны, повышает точность согласующей

модели, а с другой стороны – усложняет ее применение, главным образом, при определении значений ее параметров.

Поэтому необходимо определить оптимальную степень и порядок модели. Под оптимальностью в данном случае понимается минимальное количество членов разложения, достаточное в рамках существующих требований к точности прогноза эфемерид НКА. Для этого необходимо провести априорную оценку точности прогноза ЭИ НКА ГЛОНАСС для различных коэффициентов согласующей МРД, отбросив те из них, влияние которых на погрешность прогноза для существующих требований несущественно.

Степень m модели (2.1) зависит от периода изменения угла α (геоцентрический угол, отсчитываемый в плоскости орбиты от направления на НКА до проекции направления на Солнце). Так как период изменения данного углового параметра равен времени прохождения НКА ГЛОНАСС одного витка (~12 часов), анализ изменения характеристик точности прогноза ЭИ НКА на суточном интервале является достаточным, для того чтобы определить оптимальную степень m модели и состав коэффициентов «по данному индексу».

Для проведения исследований, по априорной оценке, преобразуем модель (2.1) к следующему виду, с учетом того, что всегда $n \geq m$:

$$\Delta\kappa_i = \sum_{m=0}^n \left(\sum_{n=m}^{\infty} P_{nm}(\sin \gamma) A_{nm}^{(i)} \cos m\alpha + \sum_{n=0}^{\infty} P_{nm}(\sin \gamma) B_{nm}^{(i)} \sin m\alpha \right), i = 1, 2, 3, \quad (2.2)$$

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:

$$\Delta\kappa_i = \sum_{m=0}^n \left(C_m^{(i)}(\gamma) \cos m\alpha + D_m^{(i)}(\gamma) \sin m\alpha \right), \quad i = 1, 2, 3. \quad (2.3)$$

Поскольку величина интервала прогноза ЭИ (одни сутки) существенно меньше периода изменения угла γ , то можно принять величину коэффициентов, зависящих от γ ($C_m^{(i)}(\gamma)$ и $D_m^{(i)}(\gamma)$), на суточном интервале постоянными. При этом задача сводится к поиску оптимальной степени уже одномерного разложения (2.3)

для различных углов γ . Для упрощения исследований, в качестве гипотезы можно принять, что найденное значение оптимальной степени разложения m будет оптимальным для порядка разложения n .

Используем получившееся выражение (2.3) для проведения априорной оценки влияния степени m модели на изменение точности суточного прогноза ЭИ НКА ГЛОНАСС при различных углах γ . Суть оценки заключается 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 γ . Исследованию подлежит поведение следующего параметра:

$$\sqrt{\left[\frac{\Delta d \text{ Re}}{\Delta C_m^{(i)}(\gamma)}\right]^2 + \left[\frac{\Delta d \text{ Re}}{\Delta D_m^{(i)}(\gamma)}\right]^2}, \quad i=1,2,3, \quad (2.4)$$

где $d \text{ Re}$ – эквивалентная погрешность дальности (ЭПД) за счет ЭИ НКА, которая рассчитывается по формуле [49]:

$$d \text{ Re} = \sqrt{0,98^2 dR^2 + 0,19^2 (dL^2 + dN^2)}, \quad (2.5)$$

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.

Коэффициенты светового давления (1.17) 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 $\sim 1 \cdot 10^{-7} \dots 2 \cdot 10^{-7}$, 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 (2.4) равная 0,1 м.

Априорная оценка проводилась с использованием СПМО СВОЭВП. Рассчитывались данные точности прогноза ЭИ различных НКА для трех

фиксированных вариантов значений угла $\gamma: \gamma \cong 2^\circ$ соответствует «теневому» сезону для НКА ГЛОНАСС R19, $\gamma \cong 60^\circ$ соответствует максимальному значению данного углового параметра для орбитального движения НКА третьей плоскости, $\gamma \cong 87^\circ$ соответствует максимальному значению данного углового параметра для орбитального движения НКА R01 первой плоскости. При этом степень m модели (2.3) принимала значения от 0 до 5.

Результаты расчетов по определению оптимальной степени m модели (2.1) представлены в таблицах 2.1 – 2.3, значения в таблицах рассчитывались в соответствии с выражением (2.4).

Таблица 2.1 – Априорная оценка влияния коэффициентов разложения согласующей МРД k_1 на погрешность суточного прогноза ЭИ НКА ГЛОНАСС (размерность значений – метры)

| γ | m | | | | | |
|----------------------|------|------|------|------|------|------|
| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 2° (НКА R19) | 1,35 | 0,33 | 0,32 | 0,06 | 0,07 | 0,06 |
| 60° (НКА R19) | 0,71 | 0,34 | 0,13 | 0,02 | 0,02 | 0,01 |
| 87° (НКА R01) | 0,00 | 0,24 | 0,01 | 0,01 | 0,00 | 0,00 |

Из анализа таблицы 2.1 можно сделать вывод, что основное влияние на погрешность прогноза ЭИ НКА ГЛОНАСС для разложения модели k_1 оказывают коэффициенты вплоть до степени $m = 2$ включительно.

Таблица 2.2 – Априорная оценка влияния коэффициентов разложения согласующей МРД k_2 на погрешность суточного прогноза ЭИ НКА ГЛОНАСС (размерность значений – метры)

| γ | m | | | | | |
|---------------|------|------|------|------|------|------|
| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 2° (НКА R19) | 0,10 | 0,04 | 0,03 | 0,03 | 0,02 | 0,03 |
| 60° (НКА R19) | 5,16 | 0,84 | 0,17 | 0,03 | 0,02 | 0,02 |
| 87° (НКА R01) | 9,52 | 0,20 | 0,22 | 0,15 | 0,11 | 0,09 |

Из анализа таблицы 2.2 можно сделать вывод, что основное влияние на погрешность прогноза ЭИ НКА ГЛОНАСС для разложения модели k_2 оказывают коэффициенты вплоть до степени $m = 4$ включительно.

Таблица 2.3 – Априорная оценка влияния коэффициентов разложения согласующей МРД k_3 на погрешность суточного прогноза ЭИ НКА ГЛОНАСС (размерность значений – метры)

| γ | m | | | | | |
|---------------|------|------|------|------|------|------|
| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 2° (НКА R19) | 0,07 | 0,21 | 1,47 | 0,14 | 0,36 | 0,06 |
| 60° (НКА R19) | 0,07 | 0,34 | 0,29 | 0,05 | 0,01 | 0,00 |
| 87° (НКА R01) | 0,29 | 0,17 | 0,02 | 0,01 | 0,00 | 0,00 |

Из анализа таблицы 2.3 можно сделать вывод, что основное влияние на погрешность прогноза ЭИ НКА ГЛОНАСС для разложения модели k_3 оказывают коэффициенты вплоть до степени $m = 4$ включительно.

Итак, по результатам определения оптимальной степени модели (2.1) и с учетом принятой гипотезы об оптимальности найденного значения степени m в том числе и для порядка n , можно сказать, что целесообразно определять (уточнять) коэффициенты разложения, приведенные в таблице 2.4. При этом необходимо отметить, что состав коэффициентов разложения для согласующих моделей k_2 и k_3 можно изменять в зависимости от «теневых» сезонов: при $|\gamma| < 15^\circ$ модель k_3 будет включать максимальный состав уточняемых

коэффициентов разложения (соответствующий четвертому порядку и степени разложения), а модель κ_2 – минимальный возможный состав (соответствующий нулевому порядку и степени разложения), при $|\gamma| > 15^\circ$, наоборот, модель κ_2 будет включать максимальный состав уточняемых коэффициентов разложения (соответствующий четвертому порядку и четвертой степени разложения), а для модели κ_3 возможно ограничиться составом, соответствующим порядку и степени разложения, равному единице.

Таблица 2.4 – Состав коэффициентов согласующей МРД

| КСД | $n(m)$ | | | | | |
|------------|--------|---|---|---|---|---|
| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| κ_1 | + | + | + | - | - | - |
| κ_2 | + | + | + | + | + | - |
| κ_3 | + | + | + | + | + | - |

2.3. Методика определения коэффициентов высокоточной согласующей модели радиационного давления

2.3.1. Общие положения

Основная задача данной работы – определение коэффициентов разложения (2.1) с учетом выбранного в предыдущем подразделе 2.1 порядка и степени разложения. Предпосылкой для определения коэффициентов является наличие измерительной информации достаточного объема и точности. Действительно, существующая измерительная сеть IGS обеспечивает многократный и непрерывный охват орбит высокоточными фазовыми измерениями. IGS – добровольное объединение более чем 200 агентств, занимающихся сбором данных GPS, ГЛОНАСС и других спутниковых навигационных систем с постоянно работающих базовых станций, расположенных по всему миру (рисунок 2.2). Всего (на июнь 2016 года) по миру насчитывается 497 действующих станций сети IGS [55], из них 153 станции работают по НКА ГЛОНАСС, 22 действующие станции сети расположены в России.

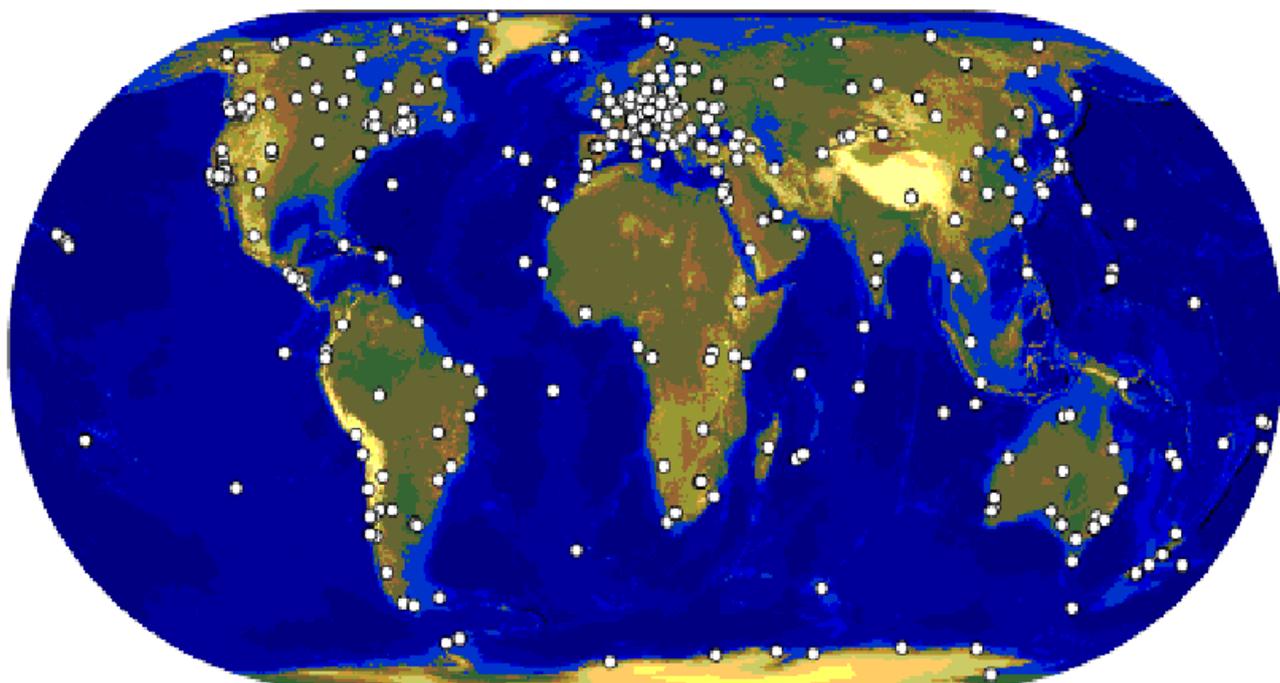


Рисунок 2.2 – Глобальная измерительная сеть IGS

Измерения глобально распределенной по поверхности Земли сети БИС IGS, выполняющих беззапросные кодовые ИТНП НКА, измерения по фазе несущей частоты навигационных сигналов (СКО случайной ошибки фазовых измерений составляет величину на уровне миллиметров) являются основным источником для расчета прецизионных эфемеридно-временных данных СВОЭВП [15]. В результате расчетов, проводимых в СВОЭВП, формируются прецизионные эфемериды и поправки к БШВ НКА, а также иная информация в интересах обеспечения решения прецизионных задач потребителями. СВОЭВП обеспечивает формирование эфемеридной информации по ГЛОНАСС со следующими точностными и оперативными характеристиками [15]:

– окончательные данные с задержкой не более 15 суток, погрешность ЭИ (по уровню вероятности 0.997) не более:

- 0,5 м вдоль орбиты;
- 0,2 м по бинормали к орбите;
- 0,1 м по радиус-вектору;

– предварительные данные с задержкой не более 1...2 суток, погрешность ЭИ (по уровню вероятности 0.997) не более:

- 3,0 м вдоль орбиты;
- 1,5 м по бинормали к орбите;
- 0,4 м по радиус-вектору;

– оперативные данные с задержкой не более 1...2 часов, погрешность ЭИ (по уровню вероятности 0.997) не более:

- 5,0 м вдоль орбиты;
- 2,0 м по бинормали к орбите;
- 0,7 м по радиус-вектору.

Так как ЭИ СВОЭВП определяется на трехсуточном мерном интервале при использовании измерений глобальной сети БИС и восьмисуточном мерном интервале при использовании измерений региональной сети БИС, то годовая периодика в поведении коэффициентов разложения согласующей МРД, обусловленная углом γ , будет не наблюдаема по измерениям. Использовать же для определения ЭИ и коэффициентов разложения согласующей МРД годовые интервалы на практике невозможно, основная причина – ограничение по производительности расчетов, при использовании глобальной сети БИС (~ 150 станций). Следовательно, для определения коэффициентов разложения согласующей МРД необходимо использовать другие подходы, например, связанные с двухэтапной обработкой первичной измерительной информации:

– на первом этапе определяются и накапливаются исходные данные для определения коэффициентов разложения согласующей МРД;

– на втором этапе определяются сами коэффициенты разложения согласующей МРД.

В настоящее время для определения параметров орбит НКА ГЛОНАСС в СВОЭВП применяется беззапросная технология с использованием измерений глобальной сети беззапросных приёмников по двухчастотным фазовым

измерениям. При совместной обработке измерений БИС по всей группировке НКА ГЛОНАСС уточняются следующие параметры:

- кинематические параметры движения всех НКА;
- параметры МРД НКА – κ_1 , κ_2 , κ_3 по трем основным направлениям НПССК;
- согласующий импульс (до 2-х на витке для каждого НКА);
- зенитная тропосферная задержка для каждой БИС – постоянная величина на интервале до 3-х часов;
- ПВЗ (координаты и скорости полюса, эксцесс суток);
- координаты отдельных БИС.

Оценка неоднозначности фазы для каждого интервала непрерывности фазы несущей частоты уточняется неявно с использованием специального метода формирования системы уравнений, что значительно снижает размерность задачи. Тем не менее, количество уточняемых параметров составляет несколько тысяч, что неблагоприятно сказывается на обусловленности матрицы системы и вычислительной устойчивости решения системы условных уравнений. Наиболее простым способом согласования коэффициентов согласующей МРД является включение этих параметров в состав уточняемых при решении задачи определения параметров орбиты. Однако из-за большого количества коэффициентов согласующей МРД (более 50-ти) и, как было уже сказано, плохой обусловленности и вычислительной устойчивости такой подход не позволяет достичь требуемого результата по точности согласования.

Исходя из этого, была разработана методика определения коэффициентов согласующей МРД, основанная на использовании прецизионных эфемерид. Предлагается использовать подход с разделением долгопериодической (сезонной) и короткопериодической (витковой) составляющими разложения (2.1). Суть подхода заключается в двухэтапном определении коэффициентов:

– на первом этапе, с использованием коротких интервалов согласования (сутки), уточняются значения промежуточных коэффициентов разложения (2.3) при витковой составляющей;

– на втором этапе полученные промежуточные значения коэффициентов обрабатываются на годовом интервале, и по результатам их обработки определяются конечные коэффициенты разложения (2.1), описывающие сезонную составляющую.

На первом этапе в качестве измерительной информации используются прецизионные эфемериды НКА, а вектор уточняемых параметров представляет собой только промежуточные коэффициенты разложения упрощенной согласующей МРД (2.3) $C_m^{(i)}(\gamma)$ 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) [30]. 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 α (витковая периодическая составляющая), так как на нескольких сутках угол γ практически не изменяется. Далее происходит накопление выборок $C_m^{(i)}(\gamma)$ и $D_m^{(i)}(\gamma)$ на длительном (годовом) интервале времени.

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 [30] конечные коэффициенты разложения (2.1) $A_{nm}^{(i)}, B_{nm}^{(i)}$, зависящие не только от угла α (витковая периодическая составляющая), но и от угла γ (сезонная периодическая составляющая), так как описанные выше коэффициенты связаны соотношением (см. раздел 2.1):

$$C_m^i(\gamma) = \sum_{n=m}^{\infty} P_{nm}(\sin \gamma) A_{nm}^i, \quad (2.6)$$

$$D_m^i(\gamma) = \sum_{n=m}^{\infty} P_{nm}(\sin \gamma) B_{nm}^i.$$

Итак, далее рассмотрим подробно каждый этап определения коэффициентов разложения согласующей МРД (2.1).

2.3.2. Методика определения промежуточных коэффициентов разложения согласующей модели радиационного давления по прецизионной эфемеридной информации

2.3.2.1. Назначение

Методика позволяет определить (уточнить) значения промежуточных коэффициентов разложения согласующей МРД НКА по прецизионной ЭИ НКА.

2.3.2.2. 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 продолжаются до тех пор, пока все элементы вектора поправок к уточняемым параметрам не станут достаточно малыми.

2.3.2.3. Исходные данные

Исходными данными для определения промежуточных коэффициентов разложения согласующей МРД являются:

- интервал согласования $[T_0, T_0 + I]$ – время начала согласования и длина интервала I ;

- шаг согласования h ;
- 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.

Таблица 2.5 – Технологические параметры уточнения промежуточных коэффициентов разложения согласующей МРД

| Параметр | Значение |
|--|----------|
| интервал согласования I | сутки |
| шаг согласования h | 15 минут |
| начальное значение уточняемых параметров p_j^0 | 0 |

2.3.2.4. Определяемые величины

Для каждого НКА в вектор уточняемых параметров P входят:

- промежуточные коэффициенты $C_m^1, D_m^1, C_m^2, D_m^2, C_m^3, D_m^3$ упрощенной согласующей модели радиационного давления (2.3), согласно определенным выше порядку и степени разложения n и m для коэффициентов светового давления по осям НПССК (таблица 2.4) вектор P имеет следующий вид:

$$\begin{aligned}
 P = \{ & C_0^1, C_1^1, C_2^1, D_1^1, D_2^1, \\
 & C_0^2, C_1^2, C_2^2, C_3^2, C_4^2, D_1^2, D_2^2, D_3^2, D_4^2, \cdot \\
 & C_0^3, C_1^3, C_2^3, C_3^3, C_4^3, D_1^3, D_2^3, D_3^3, D_4^3 \}
 \end{aligned}
 \tag{2.7}$$

В общем случае количество уточняемых коэффициентов разложения согласующей МРД для конкретного НКА достигает 23.

2.3.2.5. Алгоритм определения

1) На заданном интервале I осуществляется расчет прецизионных эфемерид на требуемые моменты времени t_i с использованием интерполяционного полинома Лагранжа. В результате, на каждый момент

времени, имеем *эталонные значения* параметров движения НКА (координаты и скорости в ГСК):

$$\begin{aligned} \{\vec{R}_i, \vec{V}_i\} &= \{X_i, Y_i, Z_i, V_{Xi}, V_{Yi}, V_{Zi}\}, \\ t_i &= T_0 + ih, \\ i &= 0, \dots, u, \end{aligned} \quad (2.8)$$

$u = \left[\frac{T}{h} \right] + 1$, – количество моментов времени (измерений).

2) Далее, с использованием в согласуемой модели движения соотношения (2.3) и начальных условий параметров движения НКА определяются *расчетные значения* эфемерид в ГСК на моменты времени t_i :

$$\{\vec{r}_i, \vec{v}_i\} = \{x_i, y_i, z_i, v_{xi}, v_{yi}, v_{zi}\}, \quad (2.9)$$

3) Для вектора уточняемых параметров P с элементами p_j формируется возмущенный вектор:

$$P_j = \{p_1, \dots, p_j + \Delta p_j, \dots, p_s\}, \quad (2.10)$$

где Δp_j – приращение j -го параметра.

4) С использованием возмущенного вектора P_j и согласуемой модели движения, рассчитываются возмущенные параметры движения НКА в ГСК на моменты времени t_i :

$$\{\vec{r}_{ij}, \vec{v}_{ij}\} = \{x_{ij}, y_{ij}, z_{ij}, v_{xij}, v_{yij}, v_{zij}\}, \quad (2.11)$$

5) В каждый момент времени t_i рассчитываются:

– невязки в орбитальной системе координат (ОрСК) (радиальная, трансверсальная и бинормальная) составляющие:

$$\begin{bmatrix} \Delta R_i \\ \Delta L_i \\ \Delta N_i \end{bmatrix} = M_i \begin{bmatrix} X_i - x_i \\ Y_i - y_i \\ Z_i - z_i \end{bmatrix}, \quad (2.12)$$

где M – матрица перехода от ГСК к ОрСК, элементы которой рассчитываются по формулам (для удобства индекс i момента времени опущен):

$$\begin{aligned}
\vec{m}_1 &= \begin{bmatrix} m_{11} \\ m_{21} \\ m_{31} \end{bmatrix} = \frac{\vec{r}}{r} \\
\vec{m}_3 &= \begin{bmatrix} m_{13} \\ m_{23} \\ m_{33} \end{bmatrix} = \frac{\vec{r} \times \vec{v}_a}{|\vec{r} \times \vec{v}_a|}, \\
\vec{m}_2 &= \begin{bmatrix} m_{12} \\ m_{22} \\ m_{32} \end{bmatrix} = \vec{m}_3 \times \vec{m}_1 \\
\vec{v}_a &= \vec{v} - \vec{\Omega}_3 \times \vec{r},
\end{aligned} \tag{2.13}$$

где $\vec{\Omega}_3 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \Omega_3 \end{bmatrix}$ – вектор угловой скорости Земли.

– численным методом конечных разностей рассчитываются приближенные значения частных производных от измеряемых по уточняемым параметрам:

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial R_i}{\partial p_j} \\ \frac{\partial L_i}{\partial p_j} \\ \frac{\partial N_i}{\partial p_j} \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta p_j} M_i \begin{bmatrix} x_{ij} - x_i \\ y_{ij} - y_i \\ z_{ij} - z_i \end{bmatrix}. \tag{2.14}$$

б) Оценивание вектора уточняемых параметров P осуществляется путем решения системы уравнений вида:

$$A \Delta P = B, \tag{2.15}$$

где $A = H^T K^{-1} H$ – матрица системы нормальных уравнений;

$B = H^T K^{-1} \Delta Y$ – вектор правых частей системы нормальных уравнений;

$H_{[3u \times s]}$ – матрица частных производных от измеряемых параметров по уточняемым, $3u$ – число измерений (2.8), s – число уточняемых параметров (2.7);

$K_{[3u \times 3u]}$ – корреляционная матрица измеряемых параметров, причем $W = K^{-1}$ – матрица весов измеряемых параметров, составляющие данной матрицы $W_R = 0.98, W_L = W_N = 0.19$ – веса радиальной, трансверсальной и бинормальной составляющей (2.5);

$\Delta P_{[s \times 1]}$ – вектор поправок к уточняемым параметрам;

$\Delta Y_{[3u \times 1]}$ – вектор невязок измеряемых параметров (2.12).

Матрица H , W и вектор ΔY имеют следующий вид:

$$H = \begin{bmatrix} \frac{\partial R_1}{\partial p_1} & \dots & \frac{\partial R_1}{\partial p_s} \\ \frac{\partial L_1}{\partial p_1} & \dots & \frac{\partial L_1}{\partial p_s} \\ \frac{\partial N_1}{\partial p_1} & \dots & \frac{\partial N_1}{\partial p_s} \\ \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial N_u}{\partial p_1} & \dots & \frac{\partial N_u}{\partial p_s} \end{bmatrix}, \quad W = \begin{bmatrix} W_R & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & W_L & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & W_N & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & W_N \end{bmatrix}, \quad (2.16)$$

$$\Delta Y = \begin{bmatrix} \Delta R_1 \\ \Delta L_1 \\ \Delta N_1 \\ \dots \\ \Delta N_u \end{bmatrix}.$$

Соответственно, можно записать:

$$\begin{aligned} H^T W H \Delta P &= H^T W \Delta Y, \\ \Delta P &= (H^T W H)^{-1} H^T W \Delta Y. \end{aligned} \quad (2.17)$$

Полученные в результате решения системы уравнений компоненты вектора поправок ΔP прибавляются к элементам вектора состояния P^0 , взятым в качестве нулевого приближения.

7) Формируется вектор уточняемых параметров с учетом рассчитанных поправок, являющийся начальным приближением для следующей итерации:

$$P^1 = P^0 + \Delta P^0. \quad (2.18)$$

8) Шаги 2...7 повторяются до тех пор, пока составляющие вектора поправок ΔP^x на итерации x не станут достаточно малыми.

В качестве прецизионных эфемерид НКА используются данные, определяемые по глобальной сети БИС в режиме апостериорной обработки в СВОЭВП. Погрешность указанной ЭИ находится на сантиметровом уровне [15]. Согласование промежуточных коэффициентов разложения проводится со сдвигом в одни сутки. Особенностью методики является использование прецизионной ЭИ НКА в качестве измерительной информации.

2.3.3. Методика определения результирующих коэффициентов разложения согласующей модели радиационного давления

2.3.3.1. Назначение

Методика позволяет определить (уточнить) значения коэффициентов разложения согласующей МРД НКА по результатам согласования промежуточных данных с использованием прецизионной ЭИ (см. раздел 2.2.2).

2.3.3.2. 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 (п.2.2.2) 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;

6) Из решения системы уравнений определяется вектор поправок к уточняемым параметрам на текущей итерации;

7) Итерации продолжаются до тех пор, пока все элементы вектора поправок к уточняемым параметрам не станут достаточно малыми.

2.3.3.3. Исходные данные

Исходными данными для уточнения коэффициентов разложения согласующей МРД являются:

- интервал уточнения $[T_0, T_0 + I]$ – время начала и длина интервала I ;
- шаг уточнения h ;
- результаты решений согласования коэффициентов упрощённой согласующей МРД $C_m^{(i)}(\gamma)$ и $D_m^{(i)}(\gamma)$ в соответствии с (2.3) на заданном интервале I . Количество коэффициентов определяется по таблице 2.4. В результате имеем выборки значений промежуточных коэффициентов на интервале I для различных углов γ , которые в дальнейшем используются в качестве *измерительной информации*:

$$\begin{aligned}
C_0^1(\gamma) &= \left\{ c_{0z}^1 \right\}_{z=1}^u, \\
C_1^1(\gamma) &= \left\{ c_{1z}^1 \right\}_{z=1}^u, D_1^1(\gamma) = \left\{ d_{1z}^1 \right\}_{z=1}^u, \\
C_2^1(\gamma) &= \left\{ c_{2z}^1 \right\}_{z=1}^u, D_2^1(\gamma) = \left\{ d_{2z}^1 \right\}_{z=1}^u, \\
C_0^2(\gamma) &= \left\{ c_{0z}^2 \right\}_{z=1}^u, \\
C_1^2(\gamma) &= \left\{ c_{1z}^2 \right\}_{z=1}^u, D_1^2(\gamma) = \left\{ d_{1z}^2 \right\}_{z=1}^u, \\
C_2^2(\gamma) &= \left\{ c_{2z}^2 \right\}_{z=1}^u, D_2^2(\gamma) = \left\{ d_{2z}^2 \right\}_{z=1}^u, \\
C_3^2(\gamma) &= \left\{ c_{3z}^2 \right\}_{z=1}^u, D_3^2(\gamma) = \left\{ d_{3z}^2 \right\}_{z=1}^u, \\
C_4^2(\gamma) &= \left\{ c_{4z}^2 \right\}_{z=1}^u, D_4^2(\gamma) = \left\{ d_{4z}^2 \right\}_{z=1}^u, \\
C_0^3(\gamma) &= \left\{ c_{0z}^3 \right\}_{z=1}^u, \\
C_1^3(\gamma) &= \left\{ c_{1z}^3 \right\}_{z=1}^u, D_1^3(\gamma) = \left\{ d_{1z}^3 \right\}_{z=1}^u, \\
C_2^3(\gamma) &= \left\{ c_{2z}^3 \right\}_{z=1}^u, D_2^3(\gamma) = \left\{ d_{2z}^3 \right\}_{z=1}^u, \\
C_3^3(\gamma) &= \left\{ c_{3z}^3 \right\}_{z=1}^u, D_3^3(\gamma) = \left\{ d_{3z}^3 \right\}_{z=1}^u, \\
C_4^3(\gamma) &= \left\{ c_{4z}^3 \right\}_{z=1}^u, D_4^3(\gamma) = \left\{ d_{4z}^3 \right\}_{z=1}^u,
\end{aligned} \tag{2.19}$$

где z – номер реализации значения коэффициента;

γ – склонение Солнца к плоскости орбиты;

u – количество реализаций (измерений).

– начальное приближение $P^0 = \left\{ p_j^0 \right\}_{j=1}^s$ вектора уточняемых параметров.

Таблица 2.6 – Технологические параметры уточнения коэффициентов разложения согласующей МРД

| Параметр | Значение |
|--|----------|
| интервал уточнения I | 1 год |
| шаг уточнения h | 1 сутки |
| начальное значение уточняемых параметров p_j^0 | 0 |

2.3.3.4. Определяемые величины

Для каждого НКА в вектор уточняемых параметров P входят:

– коэффициенты $A_{nm}^1, B_{nm}^1, A_{nm}^2, B_{nm}^2, A_{nm}^3, B_{nm}^3$ согласующей модели радиационного давления (2.1), согласно определенным выше порядку и степени разложения n и m для коэффициентов светового давления по осям НПССК (таблица 2.4) вектор P имеет следующий вид:

$$\begin{aligned}
 P = \{ & A_{00}^1, A_{10}^1, A_{11}^1, A_{20}^1, A_{21}^1, A_{22}^1, \\
 & B_{11}^1, B_{21}^1, B_{22}^1, \\
 & A_{00}^2, A_{10}^2, A_{11}^2, A_{20}^2, A_{21}^2, A_{22}^2, A_{30}^2, A_{31}^2, A_{32}^2, A_{33}^2, A_{40}^2, A_{41}^2, A_{42}^2, A_{43}^2, A_{44}^2, \\
 & B_{11}^2, B_{21}^2, B_{22}^2, B_{31}^2, B_{32}^2, B_{33}^2, B_{41}^2, B_{42}^2, B_{43}^2, B_{44}^2, \\
 & A_{00}^3, A_{10}^3, A_{11}^3, A_{20}^3, A_{21}^3, A_{22}^3, A_{30}^3, A_{31}^3, A_{32}^3, A_{33}^3, A_{40}^3, A_{41}^3, A_{42}^3, A_{43}^3, A_{44}^3, \\
 & B_{11}^3, B_{21}^3, B_{22}^3, B_{31}^3, B_{32}^3, B_{33}^3, B_{41}^3, B_{42}^3, B_{43}^3, B_{44}^3 \}
 \end{aligned} \tag{2.20}$$

В общем случае количество уточняемых коэффициентов разложения согласующей МРД для конкретного НКА достигает 59.

2.3.3.5. Алгоритм определения

1) С использованием вектора P^0 и соотношений (2.21), определяются расчетные значения коэффициентов $C_m^{(i)}(\gamma)$ и $D_m^{(i)}(\gamma)$ для углов γ , соответствующих измеренным значениям (2.20):

$$C_m^i(\gamma) = \sum_{n=m}^{\infty} P_{nm}(\sin \gamma) A_{nm}^i, \tag{2.21}$$

$$D_m^i(\gamma) = \sum_{n=m}^{\infty} P_{nm}(\sin \gamma) B_{nm}^i.$$

2) Для каждой γ рассчитываются невязки измеряемых параметров:

$$\Delta C_m^i(\gamma) = \begin{bmatrix} c_{00}^i - \hat{c}_{00}^i \\ \dots \\ c_{mu}^i - \hat{c}_{mu}^i \end{bmatrix}, \quad \Delta D_m^i(\gamma) = \begin{bmatrix} d_{00}^i - \hat{d}_{00}^i \\ \dots \\ d_{mu}^i - \hat{d}_{mu}^i \end{bmatrix}. \tag{2.22}$$

3) Частные производные рассчитываются аналитически, причем:

$$\frac{\partial C_m^i}{\partial B_{nm}^i} = \frac{\partial D_m^i}{\partial A_{nm}^i} = 0,$$

$$\frac{\partial C_m^i}{\partial A_{nm}^i} = \frac{\partial D_m^i}{\partial B_{nm}^i} = 0, \text{ при различных значениях } m \text{ в числителе и знаменателе,} \quad (2.23)$$

знаменателе,

$$\frac{\partial C_m^i}{\partial A_{nm}^i} = \frac{\partial D_m^i}{\partial B_{nm}^i} = P_{nm} \sin(\gamma), \text{ при равных значениях } m \text{ в числителе и знаменателе.}$$

4) Оценивание вектора уточняемых параметров P осуществляется путем решения системы уравнений вида:

$$A \Delta P = B, \quad (2.24)$$

где $A = H^T K^{-1} H$ – матрица системы нормальных уравнений;

$B = H^T K^{-1} \Delta Y$ – вектор правых частей системы нормальных уравнений;

$H_{[u \times s]}$ – матрица частных производных от измеряемых параметров по уточняемым, u – число измерений (2.19), s – число уточняемых параметров (2.20);

$K_{[u \times u]}$ – корреляционная матрица измеряемых параметров, причем $W = K^{-1}$ – матрица весов измеряемых параметров, составляющие данной матрицы $W_C = W_D = 1$ – веса соответствующих коэффициентов разложения;

$\Delta P_{[s \times 1]}$ – вектор поправок к уточняемым параметрам;

$\Delta Y_{[u \times 1]}$ – вектор невязок измеряемых параметров (2.22).

Матрицы H , W и вектор ΔY имеют следующий вид:

$$\begin{aligned}
 \mathbf{H} &= \begin{bmatrix} \frac{\partial C_{00}^1}{\partial A_{00}^1} & \frac{\partial C_{00}^1}{\partial B_{00}^1} & \dots & \frac{\partial C_{00}^1}{\partial A_{nm}^i} & \frac{\partial C_{00}^1}{\partial B_{nm}^i} \\ \frac{\partial D_{00}^1}{\partial A_{00}^1} & \frac{\partial D_{00}^1}{\partial B_{00}^1} & \dots & \frac{\partial D_{00}^1}{\partial A_{nm}^i} & \frac{\partial D_{00}^1}{\partial B_{nm}^i} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial C_{mu}^i}{\partial A_{00}^1} & \frac{\partial C_{mu}^i}{\partial B_{00}^1} & \dots & \frac{\partial C_{mu}^i}{\partial A_{nm}^i} & \frac{\partial C_{mu}^i}{\partial B_{nm}^i} \\ \frac{\partial D_{mu}^i}{\partial A_{00}^1} & \frac{\partial D_{mu}^i}{\partial B_{00}^1} & \dots & \frac{\partial D_{mu}^i}{\partial A_{nm}^i} & \frac{\partial D_{mu}^i}{\partial B_{nm}^i} \end{bmatrix}, \\
 \mathbf{W} &= \begin{bmatrix} W_C & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & W_D & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & W_C & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & W_D \end{bmatrix}, \\
 \Delta Y &= \begin{bmatrix} \Delta C_{00}^1 \\ \Delta D_{00}^1 \\ \dots \\ \Delta C_{mu}^i \\ \Delta D_{mu}^i \end{bmatrix}.
 \end{aligned} \tag{2.25}$$

Соответственно, можно записать:

$$\begin{aligned}
 \mathbf{H}^T \mathbf{W} \mathbf{H} \Delta P &= \mathbf{H}^T \mathbf{W} \Delta Y, \\
 \Delta P &= (\mathbf{H}^T \mathbf{W} \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^T \mathbf{W} \Delta Y.
 \end{aligned} \tag{2.26}$$

5) Полученные в результате решения системы уравнений компоненты вектора поправок ΔP прибавляются к элементам вектора состояния P^0 , взятым в качестве нулевого приближения.

6) Формируется вектор уточняемых параметров с учетом рассчитанных поправок, являющийся начальным приближением для следующей итерации:

$$P^1 = P^0 + \Delta P^0, \tag{2.27}$$

7) Шаги 1...6 повторяются до тех пор, пока составляющие вектора поправок ΔP^x на итерации x не станут достаточно малыми.

Особенностью методики является наличие двух этапов для определения результирующих коэффициентов $A_{nm}^{(i)}, B_{nm}^{(i)}$ (2.1).

Выводы по второму разделу:

Выбран вид новой высокоточной согласующей модели радиационного давления НКА ГЛОНАСС, который представляет собой разложение в ряд по сферическим функциям с зависимостью от двух угловых параметров, полностью описывающие ориентацию НКА ГЛОНАСС относительно Солнца и Земли.

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.

Разработана двухэтапная методика определения коэффициентов высокоточной согласующей модели радиационного давления, основанная на использовании прецизионных эфемерид. На первом этапе разработанной методики уточняются промежуточные коэффициенты упрощенной модели (2.3), отвечающие за влияние короткопериодических (витковых) возмущений, на втором этапе определяются окончательные коэффициенты разработанной модели, которые описывают короткопериодические (витковые) и долгопериодические (сезонные) возмущения.

3. ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ НАВИГАЦИОННЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ СИСТЕМЫ ГЛОНАСС С УЧЕТОМ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВЫСОКОТОЧНОЙ СОГЛАСУЮЩЕЙ МОДЕЛИ РАДИАЦИОННОГО ДАВЛЕНИЯ

3.1. Исходные данные и план эксперимента

Для экспериментальной отработки методик, приведенных в разделе 2, был выбран состав НКА, составляющих ОГ ГЛОНАСС на 01.07.2018. На данный момент времени группировка насчитывала 24 функционирующих в штатном режиме НКА. При проведении оценки точности прогнозирования ЭИ НКА не использовались НКА №R06 и №R12, так как данные аппараты работали в одночастотном режиме на момент проведения оценивания и получение по ним ЭИ требуемой точности для использования в качестве эталонных данных невозможно. Из 22 НКА, по которым проводилась экспериментальная отработка, 21 НКА имеет модификацию «Глонасс-М» и 1 НКА №R09 – модификацию «Глонасс-К». Интервал уточнения промежуточных коэффициентов $C_m^{(i)}(\gamma)$ и $D_m^{(i)}(\gamma)$, окончательных коэффициентов модели (2.1) $A_{nm}^{(i)}, B_{nm}^{(i)}$ 01.01.2017 – 01.04.2018. Интервал оценки точности прогнозирования ЭИ НКА с использованием уточненных коэффициентов новой согласующей МРД 15.07.2018 – 19.07.2018, 01.08.2018 – 31.08.2018. Выбор данных интервалов времени обусловлен следующими факторами:

- на данных интервалах времени состав ОГ претерпевал незначительные изменения, с постоянным наличием штатно функционирующих НКА в количестве 20-ти – 24-х штук;

- для получения достоверных оценок параметров модели (2.1) требуется интервал измерений, равный или больший периоду изменения углов α (геоцентрический угол, отсчитываемый в плоскости орбиты от направления на НКА до проекции направления на Солнце), и γ (склонение Солнца к плоскости орбиты), то есть не менее одного года;

– наличие на интервале оценки прогноза ЭИ для НКА хотя бы одной из плоскостей ОГ ГЛОНАСС так называемых «теневых» сезонов («теневой» сезон – временной период прохождения НКА ГЛОНАСС через зоны полной тени и полутени Земли в процессе движения по орбите, диапазон значений γ при этом составляет примерно от -15° до $+15^\circ$).

Экспериментальная отработка проводилась отдельно для каждого НКА. Расчеты проводились с помощью СПМО СВОЭВП, модернизированного в части разработанной высокоточной согласующей МРД. В качестве прецизионной ЭИ использовались окончательные данные СВОЭВП.

Для подтверждения выполнения целевой задачи данной работы экспериментальная оценка точности прогнозирования оперативной ЭИ для НКА ГЛОНАСС проводилась в двух вариантах:

- расчет и прогноз ЭИ НКА по технологии оперативного ЭО ГЛОНАСС с использованием существующей согласующей МРД;
- расчет и прогноз ЭИ НКА по технологии оперативного ЭО ГЛОНАСС с использованием новой (предлагаемой в данной работе) согласующей МРД.

Расчет и прогнозирование ЭИ проводился по следующей технологии оперативного ЭО ГЛОНАСС [19]. В данном случае под технологией оперативного ЭО ГЛОНАСС понимается беззапросная технология ЭО с использованием вторых разностей фазовых измерений. При этом проведение беззапросных измерений псевдодальности и псевдоскорости осуществляется доступными БИС непрерывно по всей зоне видимости НКА ГЛОНАСС, начиная с угла места 10 градусов, по всем сигналам и во всех частотных диапазонах существующих (L1, L2, L3) сигналов с одновременным измерением приращения фазы несущей частоты (измерением псевдодальности по фазе несущей частоты) и приемом цифровой информации. Беззапросная технология ЭО с использованием вторых разностей фазовых измерений разработана для случая орбитальной группировки не менее чем 18 НКА при получении информации не менее чем от 10 БИС. Формирование вторых разностей предназначено для исключения влияния

нестабильности частоты как бортовых, так и наземных стандартов, достигаемого в дифференциальных изохронных измерениях. Одним из основных факторов, влияющих на точность определения эфемерид при обработке вторых разностей фазовых измерений, является кратность покрытия дуг орбит разностными измерениями и погрешность учета условий распространения электромагнитного сигнала в тропосфере. С использованием даже региональной сети средств НКУ системы ГЛОНАСС открывается возможность уточнения зенитной задержки тропосферы, а также скорости ее изменения на интервалах 2-4 часа. Технологические циклы оперативного эфемеридного обеспечения по основным НКА выполняются одновременно по всей орбитальной группировке НКА (многообъектный режим) по измерениям беззапросных измерительных средств ГЛОНАСС, расположенных на территории России – на интервале 17 витков (8 суток). Расчеты проводятся по расписанию 1 раз в 4...6 часов. Общая схема предусматривает проведение сеансов беззапросных измерений на каждом витке на углах места не менее 7° . Порядок эфемеридного обеспечения основных НКА по беззапросной технологии следующий:

- прием и предварительная обработка ИТНП; анализ полноты поступления и качества измерительной информации; выявление скачков и аномальных измерений, их отбраковка; препроцессинг фазовых измерений для анализа и восстановления пропусков циклов на этапе предварительной обработки (алгоритм применяется только при одновременном наблюдении НКА тремя и более БИС);

- формирование вторых разностей фазовых измерений на последних сутках мерного интервала; выявление аномальных измерений в сеансах вторых разностях и их отбраковка;

- осреднение и прореживание фактической выборки измерений для уменьшения объема измерительной выборки (при необходимости); шаг прореженной выборки измерений – 5 минут;

– решение задачи уточнения параметров движения; в состав уточняемых параметров включаются:

- $K \times 6$ кинематических параметров движения НКА (K – число НКА);
- параметры модели радиационного давления НКА – $\kappa_1, \kappa_2, \kappa_3$ по трем основным направлениям НПССК;
- согласующий импульс (до 2-х на витке для каждого НКА);
- зенитная тропосферная задержка для каждой БИС – постоянная величина на интервале до 3-х часов;
- ПВЗ (координаты и скорости полюса, эксцесс суток);
- координаты отдельных БИС.

– оценка неоднозначности фазы для каждого интервала непрерывности фазы несущей частоты уточняется неявно с использованием специального метода формирования системы уравнений, что значительно снижает размерность задачи;

– проведение контроля УНУ относительно предыдущего решения. Запись полученных УНУ в качестве основных;

– прогнозирование движения НКА на интервале до 15 часов.

Расчет форм специнформации (СИ) ЭО проводится независимо от расчета эфемеридной информации в соответствии планом закладок форм СИ.

Непосредственно оценка прогноза ЭИ НКА ГЛОНАСС производится следующим образом [20]:

– расчет отклонений значений эфемерид сформированных форм СИ относительно значений эфемерид, принятых за эталон (прецизионные данные СВОЭВП);

– расчет статистических данных отклонений по каждому НКА и в целом по ОГ ГЛОНАСС.

3.2. Определение параметров согласующей модели радиационного давления

Методика определения коэффициентов согласующей МРД (п. 2.3) основана на использовании прецизионных эфемерид. При этом применяется схема с разделением долгопериодической (сезонной) и короткопериодической (витковой) составляющими разложения. Суть этой схемы заключается в двухэтапном согласовании коэффициентов – на первом этапе с использованием коротких интервалов согласования (1 сутки) уточнялись значения промежуточных коэффициентов $C_m^{(i)}(\gamma)$ и $D_m^{(i)}(\gamma)$ при витковой составляющей. На втором этапе полученные промежуточные значения обрабатывались на длительном интервале (14 месяцев), и по результатам их обработки восстанавливалась сезонная составляющая – конечные коэффициенты модели (2.1) $A_{nm}^{(i)}, B_{nm}^{(i)}$. Более подробно порядок разделения витковых и сезонных периодик возмущений был описан в разделе 2.1. Разработанная методика позволила получить устойчивые и интерпретируемые значения коэффициентов согласующей модели радиационного давления.

В процессе согласования коэффициентов было установлено, что их значения существенным образом различаются для «теневого» и «бестеневого» сезонов. Данный факт приведен на рисунках 3.1 – 3.4, где представлены результаты уточнения обработки на общем интервале.

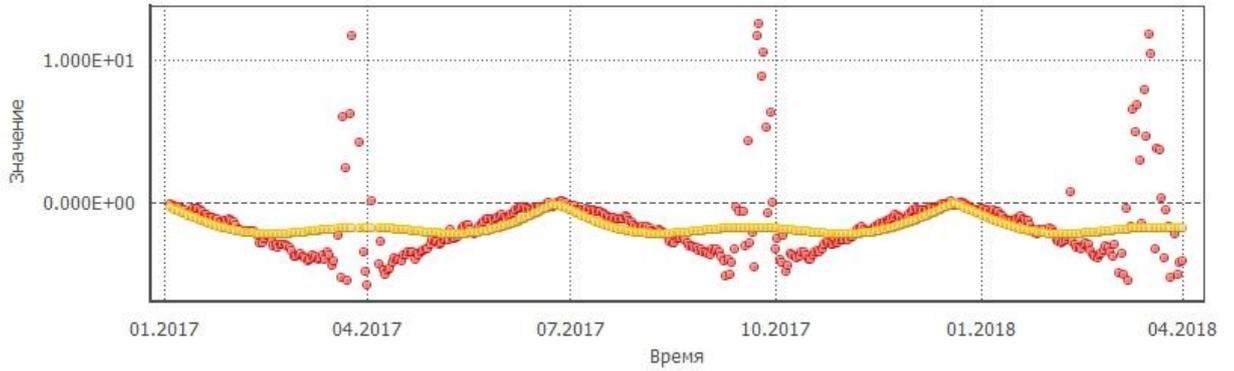


Рисунок 3.1 – Реализации определения промежуточного коэффициента $C_1^{(1)}(\gamma)$ и построенная по ним модель с использованием уточненных коэффициентов $A_{11}^{(1)}, A_{21}^{(1)}, A_{31}^{(1)}, A_{41}^{(1)}$ НКА №R08

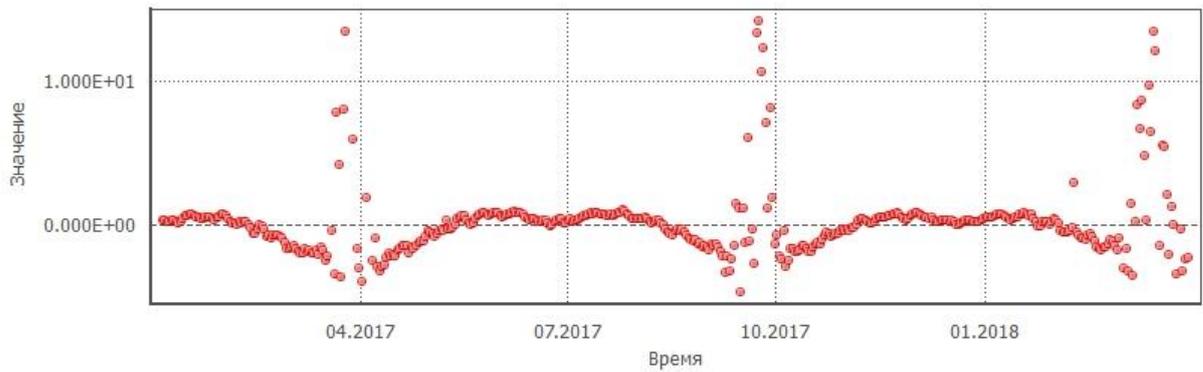


Рисунок 3.2 – Погрешность построенной модели промежуточного коэффициента $C_1^{(1)}(\gamma)$ НКА №R08

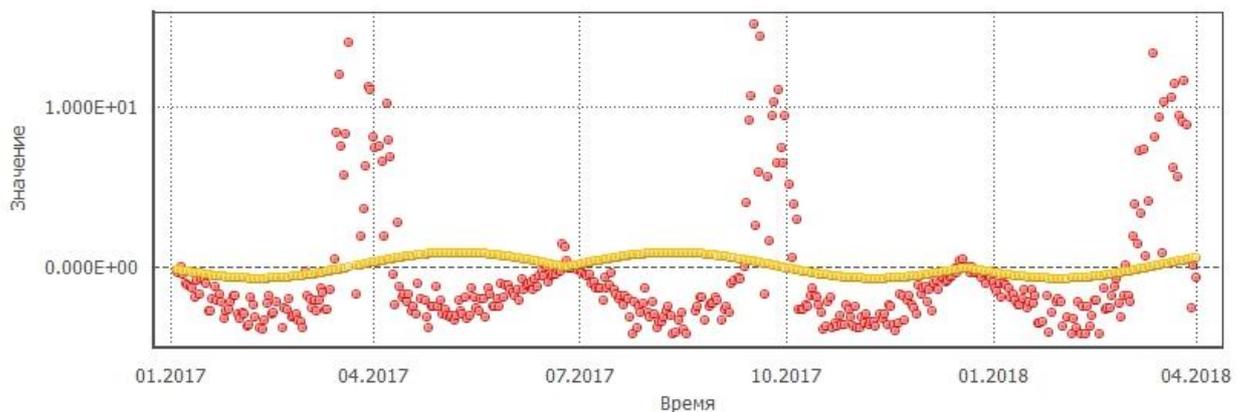


Рисунок 3.3 – Реализации определения промежуточного коэффициента $C_3^{(3)}(\gamma)$ и построенная по ним модель с использованием уточненных коэффициентов $A_{33}^{(3)}, A_{43}^{(3)}$ НКА №R08

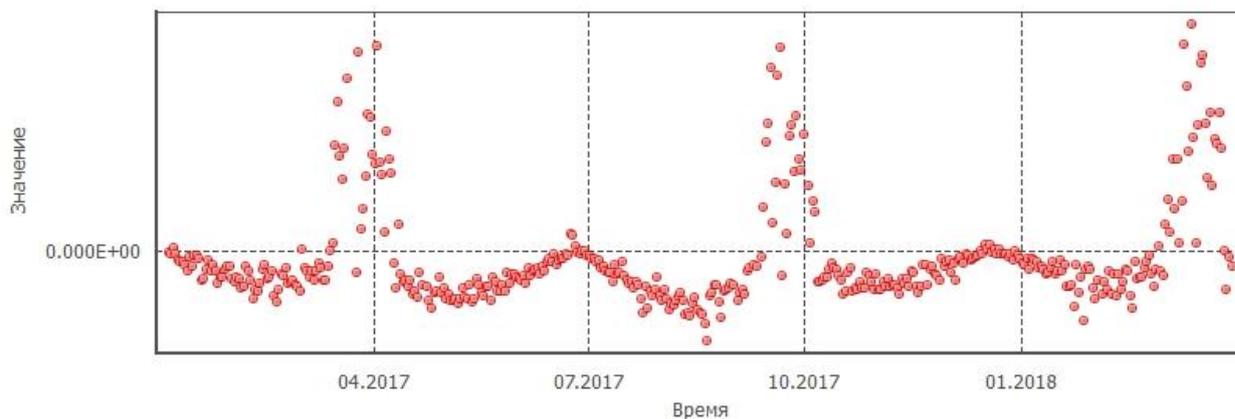


Рисунок 3.4 – Погрешность построенной модели промежуточного коэффициента $C_3^{(3)}(\gamma)$ НКА №R08

Таким образом, экспериментальная отработка подтвердила факт различного поведения системы ориентации и стабилизации НКА на «теневого» сезонах и в условиях отсутствия теней Земли.

Для упрощения картины коэффициенты согласующей МРД (2.1) уточнялись отдельно для «теневого» и «бестеневого» сезонов. Основные причины данного подхода:

- различные погрешности работы СОС НКА;
- различные погрешности эталонных параметров орбит НКА, которые используются в качестве ИД;
- выполнение требований по повышению точностных характеристик прогнозирования эфемерид НКА.

То есть фактически для каждого НКА рассчитывались два набора коэффициентов, первый из которых соответствовал согласующей МРД в «бестеневые» сезоны («световая» модель), второй для орбит с наличием «теневого» сезонов («теновая» модель). Ввиду незначительного изменения угла склонения Солнца к плоскости орбиты (γ) в «теновые» сезоны (примерно от $+15^\circ$ до -15°), количество согласуемых параметров «теновой» модели сокращалось – уточнялись коэффициенты при $m = 1, \dots, 4$ и $n = m, m + 1$, коэффициенты главной и находящейся под ней диагоналей.

3.2.1. Согласующая модель радиационного давления для «бестеневых» сезонов

В соответствии с проведенным анализом по определению оптимального порядка и степени модели (2.1) в п. 2.1, степень и порядок были приняты:

- для κ_1 $m = n = 2$;
- для κ_2, κ_3 $m = n = 4$.

В таблицах 3.1 – 3.4 приведены коэффициенты модели, которые подлежали уточнению для $\kappa_1, \kappa_2, \kappa_3$ соответственно.

Таблица 3.1 – Состав коэффициентов согласующей МРД κ_1 для «бестеневых» сезонов

| n | m | | | | |
|-----|------------------|------------------|------------------|---|---|
| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 |
| 0 | $A_{00}(C_{00})$ | - | - | - | - |
| 1 | A_{10} | $A_{11}(C_{11})$ | - | - | - |
| 2 | A_{20} | A_{21} | $A_{22}(C_{22})$ | - | - |
| 3 | - | - | - | - | - |
| 4 | - | - | - | - | - |

Таблица 3.2 – Состав коэффициентов согласующей МРД κ_1 для «бестеневых» сезонов

| n | m | | | | |
|-----|-----|------------------|------------------|---|---|
| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 |
| 0 | - | - | - | - | - |
| 1 | - | $B_{11}(D_{11})$ | - | - | - |
| 2 | - | B_{21} | $B_{22}(D_{22})$ | - | - |
| 3 | - | - | - | - | - |
| 4 | - | - | - | - | - |

Таблица 3.3 – Состав коэффициентов согласующей МРД κ_2 , κ_3 для «бестеневых» сезонов

| n | m | | | | |
|-----|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 |
| 0 | $A_{00}(C_{00})$ | - | - | - | - |
| 1 | A_{10} | $A_{11}(C_{11})$ | - | - | - |
| 2 | A_{20} | A_{21} | $A_{22}(C_{22})$ | - | - |
| 3 | A_{30} | A_{31} | A_{32} | $A_{33}(C_{33})$ | - |
| 4 | A_{40} | A_{41} | A_{42} | A_{43} | $A_{44}(C_{44})$ |

Таблица 3.4 – Состав коэффициентов согласующей МРД κ_2 , κ_3 для «бестеневых» сезонов

| n | m | | | | |
|-----|-----|------------------|------------------|------------------|------------------|
| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 |
| 0 | - | - | - | - | - |
| 1 | - | $B_{11}(D_{11})$ | - | - | - |
| 2 | - | B_{21} | $B_{22}(D_{22})$ | - | - |
| 3 | - | B_{31} | B_{32} | $B_{33}(D_{33})$ | - |
| 4 | - | B_{41} | B_{42} | B_{43} | $B_{44}(D_{44})$ |

В результате реализации методик, приведенных в п. 2.2, были получены наборы коэффициентов согласующей МРД (2.1) по всем НКА штатной ОГ ГЛОНАСС на 01.07.2018 (таблицы 3.5 – 3.10).

Таблица 3.5 – Уточненные коэффициенты $A_{nm}^{(1)}$ согласующей МРД κ_1 для «бестеневых» сезонов (значения увеличены в 10^7 раз)

| НКА | A_{00} | A_{10} | A_{20} | A_{30} | A_{40} | A_{11} | A_{21} | A_{31} | A_{41} | A_{22} | A_{32} | A_{42} | A_{33} | A_{43} | A_{44} |
|-----|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| R01 | 12,54478 | -0,45197 | 8,58662 | 0,00000 | 0,00000 | -6,90337 | -0,04601 | 0,00000 | 0,00000 | -2,33667 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 |
| R02 | 11,95445 | 0,04392 | 5,64580 | 0,00000 | 0,00000 | -6,63339 | -0,01600 | 0,00000 | 0,00000 | -0,71857 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 |
| R03 | 13,48649 | -0,09986 | 8,38229 | 0,00000 | 0,00000 | -6,67512 | 0,00895 | 0,00000 | 0,00000 | -1,39409 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 |
| R04 | 12,64140 | -0,04634 | 6,82398 | 0,00000 | 0,00000 | -6,57997 | 0,00769 | 0,00000 | 0,00000 | -1,08450 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 |
| R05 | 13,39071 | 0,10012 | 4,79539 | 0,00000 | 0,00000 | -6,61462 | 0,01447 | 0,00000 | 0,00000 | -0,54426 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 |
| R06 | 14,59786 | -0,44405 | 0,09528 | 0,00000 | 0,00000 | -6,45457 | -0,01755 | 0,00000 | 0,00000 | 1,10575 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 |
| R07 | 13,17437 | -0,17580 | 8,99868 | 0,00000 | 0,00000 | -6,57442 | -0,01131 | 0,00000 | 0,00000 | -1,54597 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 |
| R08 | 14,12828 | -0,15536 | 7,23305 | 0,00000 | 0,00000 | -6,60087 | -0,02957 | 0,00000 | 0,00000 | -1,05266 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 |
| R09 | 3,22961 | -0,07523 | 27,02482 | 0,00000 | 0,00000 | 1,11329 | 0,06777 | 0,00000 | 0,00000 | -3,16117 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 |
| R10 | 14,84113 | -0,22661 | 2,51987 | 0,00000 | 0,00000 | -6,55789 | 0,03292 | 0,00000 | 0,00000 | 0,29007 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 |
| R11 | 13,38284 | -0,05612 | 4,38985 | 0,00000 | 0,00000 | -6,70959 | 0,04169 | 0,00000 | 0,00000 | -0,19259 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 |
| R12 | 11,15736 | -0,04956 | 24,32495 | 0,00000 | 0,00000 | -6,38855 | 0,01573 | 0,00000 | 0,00000 | -4,46401 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 |
| R13 | 14,21179 | 0,03268 | 2,39868 | 0,00000 | 0,00000 | -6,73293 | 0,05403 | 0,00000 | 0,00000 | 0,23975 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 |
| R14 | 13,07756 | 0,08170 | 5,76056 | 0,00000 | 0,00000 | -6,55934 | 0,01498 | 0,00000 | 0,00000 | -0,62591 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 |
| R15 | 12,75169 | 1,20220 | 7,16611 | 0,00000 | 0,00000 | -6,56856 | 0,02134 | 0,00000 | 0,00000 | -0,80746 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 |
| R16 | 13,32093 | 0,42360 | 3,16697 | 0,00000 | 0,00000 | -6,59813 | 0,01985 | 0,00000 | 0,00000 | 0,33950 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 |
| R17 | 11,09164 | 0,01835 | 8,76336 | 0,00000 | 0,00000 | -6,48295 | 0,03940 | 0,00000 | 0,00000 | -1,35812 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 |
| R18 | 13,05066 | 0,54291 | 4,43960 | 0,00000 | 0,00000 | -6,05272 | -0,07863 | 0,00000 | 0,00000 | -0,27060 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 |
| R19 | 12,60995 | 0,25234 | 12,20260 | 0,00000 | 0,00000 | -6,53773 | 0,04060 | 0,00000 | 0,00000 | -2,24716 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 |
| R20 | 12,55461 | -0,13849 | 6,96058 | 0,00000 | 0,00000 | -6,46377 | 0,08318 | 0,00000 | 0,00000 | -1,09661 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 |
| R21 | 12,53224 | 0,23641 | 9,01348 | 0,00000 | 0,00000 | -6,52111 | 0,03033 | 0,00000 | 0,00000 | -1,28312 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 |
| R22 | 13,68727 | 0,38720 | 9,62324 | 0,00000 | 0,00000 | -6,53586 | 0,01608 | 0,00000 | 0,00000 | -1,51588 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 |
| R23 | 10,48964 | 0,14473 | -3,04674 | 0,00000 | 0,00000 | -6,45520 | 0,02968 | 0,00000 | 0,00000 | 1,69457 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 |
| R24 | 14,18600 | 0,12587 | 2,81306 | 0,00000 | 0,00000 | -6,49337 | 0,07338 | 0,00000 | 0,00000 | 0,63459 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 |

Таблица 3.6 – Уточненные коэффициенты $B_{nm}^{(1)}$ согласующей МРД K_1 для «бестеневых» сезонов (значения увеличены в 10^7 раз)

| НКА | B_{11} | B_{21} | B_{31} | B_{41} | B_{22} | B_{32} | B_{42} | B_{33} | B_{43} | B_{44} |
|-----|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| R01 | 0,03835 | 0,10100 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00413 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 |
| R02 | 0,06432 | 0,07271 | 0,00000 | 0,00000 | -0,05916 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 |
| R03 | 0,06109 | 0,06091 | 0,00000 | 0,00000 | 0,04673 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 |
| R04 | 0,04536 | 0,04324 | 0,00000 | 0,00000 | 0,01810 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 |
| R05 | 0,09275 | 0,01577 | 0,00000 | 0,00000 | -0,02817 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 |
| R06 | -0,02084 | 0,11302 | 0,00000 | 0,00000 | -0,07746 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 |
| R07 | 0,12652 | 0,08003 | 0,00000 | 0,00000 | 0,04391 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 |
| R08 | 0,03748 | 0,04967 | 0,00000 | 0,00000 | 0,15662 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 |
| R09 | -0,01829 | 0,01716 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00935 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 |
| R10 | 0,05775 | 0,04229 | 0,00000 | 0,00000 | 0,10053 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 |
| R11 | 0,00077 | 0,04650 | 0,00000 | 0,00000 | -0,01401 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 |
| R12 | 0,01826 | 0,05247 | 0,00000 | 0,00000 | 0,05252 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 |
| R13 | 0,01983 | 0,03168 | 0,00000 | 0,00000 | 0,11197 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 |
| R14 | 0,02790 | 0,04725 | 0,00000 | 0,00000 | 0,01487 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 |
| R15 | 0,06814 | 0,04701 | 0,00000 | 0,00000 | -0,02856 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 |
| R16 | -0,02808 | -0,01318 | 0,00000 | 0,00000 | 0,20985 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 |
| R17 | 0,00812 | 0,03220 | 0,00000 | 0,00000 | 0,06320 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 |
| R18 | 0,01641 | 0,03355 | 0,00000 | 0,00000 | 0,01412 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 |
| R19 | 0,00576 | 0,02002 | 0,00000 | 0,00000 | 0,05765 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 |
| R20 | 0,01095 | 0,07126 | 0,00000 | 0,00000 | -0,00910 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 |
| R21 | -0,01065 | 0,01951 | 0,00000 | 0,00000 | -0,03538 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 |
| R22 | -0,00061 | 0,04629 | 0,00000 | 0,00000 | -0,04201 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 |
| R23 | 0,00262 | 0,02626 | 0,00000 | 0,00000 | -0,09353 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 |
| R24 | -0,01011 | 0,05239 | 0,00000 | 0,00000 | -0,12714 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 |

Таблица 3.7 – Уточненные коэффициенты $A_{nm}^{(2)}$ согласующей МРД k_2 для «бестеневых» сезонов (значения увеличены в 10^7 раз)

| НКА | A_{00} | A_{10} | A_{20} | A_{30} | A_{40} | A_{11} | A_{21} | A_{31} | A_{41} | A_{22} | A_{32} | A_{42} | A_{33} | A_{43} | A_{44} |
|-----|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| R01 | 0,10588 | 0,01293 | -0,05335 | -0,01732 | 0,12074 | 0,17525 | -0,06871 | -0,04937 | 0,00930 | -0,09648 | 0,00657 | -0,01252 | 0,00330 | -0,00041 | -0,00330 |
| R02 | 0,06146 | 0,03415 | 0,07191 | -0,03792 | 0,02123 | -0,14130 | -0,05586 | 0,03088 | 0,01721 | -0,12823 | -0,00145 | -0,00796 | -0,00134 | -0,00073 | -0,00275 |
| R03 | -0,04979 | 0,03649 | 0,04991 | -0,03671 | -0,04448 | -0,03290 | -0,05456 | 0,00199 | 0,01935 | -0,09483 | 0,00165 | -0,01079 | 0,00228 | -0,00065 | -0,00226 |
| R04 | 0,01329 | 0,04376 | 0,01032 | -0,04571 | -0,05677 | -0,10114 | -0,06732 | 0,01751 | 0,02909 | -0,08493 | 0,00275 | -0,01164 | 0,00082 | -0,00085 | -0,00236 |
| R05 | -0,29005 | 0,01580 | 0,06462 | 0,02324 | 0,02679 | -0,07922 | -0,06305 | 0,00560 | 0,02523 | -0,05807 | -0,00379 | -0,01465 | 0,00228 | -0,00033 | -0,00249 |
| R06 | 0,21813 | 0,06474 | -0,02454 | 0,01199 | 0,05236 | -0,11664 | -0,07128 | 0,01023 | 0,02089 | -0,10846 | 0,00558 | -0,00992 | -0,00289 | -0,00073 | -0,00225 |
| R07 | 0,09065 | 0,05416 | 0,07077 | -0,09834 | -0,06080 | -0,08685 | -0,03680 | 0,01291 | 0,00795 | -0,14172 | -0,00296 | -0,00962 | -0,00288 | -0,00050 | -0,00315 |
| R08 | 0,31751 | 0,06588 | 0,04372 | -0,09439 | 0,02169 | -0,06718 | -0,05148 | 0,00913 | 0,00938 | -0,09392 | 0,00029 | -0,00884 | -0,00018 | -0,00061 | -0,00257 |
| R09 | -0,27483 | -0,00884 | 0,23125 | 0,34601 | -0,25588 | 0,16701 | -0,03295 | -0,04295 | 0,02629 | -0,06067 | -0,00366 | 0,00134 | 0,00135 | -0,00011 | -0,00033 |
| R10 | 0,09301 | -0,02388 | 0,28750 | -0,02246 | 0,00823 | -0,07424 | -0,03513 | 0,02442 | 0,01054 | -0,13885 | 0,00086 | -0,00035 | -0,00202 | -0,00035 | -0,00257 |
| R11 | 0,02272 | -0,04997 | 0,17868 | 0,01238 | -0,07350 | -0,16023 | -0,03503 | 0,06011 | 0,01939 | -0,12772 | -0,00155 | 0,00026 | -0,00422 | -0,00026 | -0,00264 |
| R12 | -0,06479 | -0,02748 | 0,38971 | 0,04021 | 0,29386 | 0,01130 | -0,02502 | 0,02541 | 0,01729 | -0,11244 | 0,00172 | -0,00087 | -0,00124 | -0,00039 | -0,00239 |
| R13 | -0,15731 | -0,03169 | 0,20193 | -0,13109 | 0,15875 | -0,09463 | -0,04270 | 0,04407 | 0,02743 | -0,15598 | 0,00144 | 0,00003 | 0,01324 | -0,00122 | -0,00264 |
| R14 | 0,01079 | 0,01630 | 0,10425 | -0,07682 | 0,13947 | -0,03390 | -0,04937 | 0,00816 | 0,02265 | -0,12283 | 0,00124 | -0,00487 | 0,00016 | -0,00046 | -0,00265 |
| R15 | 0,02635 | -0,08934 | 0,24561 | 0,17185 | 1,12899 | 0,33446 | -0,07423 | -0,09572 | 0,08388 | -0,12699 | 0,00229 | 0,00189 | -0,00011 | -0,00029 | -0,00233 |
| R16 | -0,03754 | -0,03645 | 0,21947 | 0,45400 | 0,34587 | 0,05530 | -0,04659 | -0,02669 | 0,07062 | -0,13462 | -0,00845 | -0,00210 | -0,00216 | -0,00044 | -0,00242 |
| R17 | -0,01891 | 0,04396 | 0,04179 | -0,19926 | 0,13537 | 0,00857 | -0,04271 | 0,00391 | 0,02475 | -0,11475 | 0,00013 | -0,00384 | -0,00012 | -0,00053 | -0,00290 |
| R18 | -0,13310 | 0,04287 | 0,27997 | -0,28181 | -0,01078 | -0,05014 | -0,02622 | 0,00854 | 0,00089 | -0,18202 | 0,00230 | 0,00047 | 0,00018 | -0,00035 | -0,00292 |
| R19 | -0,34443 | -0,01049 | 0,01496 | -0,16949 | 0,25281 | -0,05383 | -0,06122 | -0,00415 | 0,01895 | -0,13808 | -0,00116 | -0,00269 | -0,00076 | -0,00048 | -0,00269 |
| R20 | 0,07844 | 0,01822 | 0,13573 | -0,36168 | 0,37186 | 0,01808 | -0,04924 | 0,01339 | 0,01109 | -0,10672 | 0,01166 | -0,00214 | 0,00253 | -0,00010 | -0,00264 |
| R21 | 0,06459 | 0,07958 | 0,06162 | -0,12922 | -0,07924 | -0,09977 | -0,04854 | 0,02833 | 0,03393 | -0,14224 | 0,00433 | -0,00165 | -0,00252 | -0,00021 | -0,00244 |
| R22 | 0,04635 | 0,03009 | 0,16908 | -0,10086 | -0,08783 | -0,07355 | -0,04870 | 0,02468 | 0,01960 | -0,13919 | -0,00058 | -0,00195 | -0,00233 | -0,00025 | -0,00253 |
| R23 | -0,11998 | 0,01764 | 0,09859 | -0,20158 | 0,16705 | -0,05038 | -0,01594 | 0,03335 | 0,00812 | -0,14910 | 0,00000 | -0,00130 | -0,00091 | -0,00028 | -0,00313 |
| R24 | 0,23923 | 0,02381 | 0,02098 | -0,35880 | 0,53062 | -0,02154 | -0,04146 | 0,01812 | 0,00801 | -0,11651 | 0,00603 | -0,00308 | 0,00114 | -0,00017 | -0,00262 |

Таблица 3.8 – Уточненные коэффициенты $B_{nm}^{(2)}$ согласующей МРД κ_2 для «бестеневых» сезонов (значения увеличены в 10^7 раз)

| НКА | B_{11} | B_{21} | B_{31} | B_{41} | B_{22} | B_{32} | B_{42} | B_{33} | B_{43} | B_{44} |
|-----|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| R01 | 0,04084 | -0,03373 | -0,01478 | 0,02670 | -0,01435 | -0,00107 | -0,00033 | 0,00256 | -0,00331 | -0,00003 |
| R02 | -0,03110 | -0,01723 | -0,00220 | 0,02296 | -0,01545 | -0,00155 | 0,00021 | 0,00055 | -0,00258 | 0,00016 |
| R03 | -0,01100 | -0,04935 | -0,00268 | 0,03873 | -0,02156 | 0,00008 | 0,00053 | 0,00094 | -0,00338 | -0,00016 |
| R04 | 0,01567 | -0,04636 | -0,01172 | 0,02960 | -0,00216 | -0,00018 | -0,00008 | 0,00193 | -0,00296 | 0,00042 |
| R05 | 0,03942 | -0,02639 | -0,01143 | 0,01698 | 0,00301 | -0,00071 | -0,00121 | -0,00288 | -0,00199 | 0,00035 |
| R06 | -0,06128 | 0,01164 | 0,00719 | -0,00404 | 0,00065 | -0,00206 | 0,00061 | -0,00282 | -0,00034 | -0,00021 |
| R07 | 0,03053 | -0,05680 | -0,00606 | 0,03834 | -0,00493 | -0,00040 | -0,00019 | 0,00209 | -0,00388 | -0,00003 |
| R08 | 0,04091 | -0,03693 | -0,02195 | 0,03935 | -0,00384 | -0,00140 | -0,00001 | 0,00278 | -0,00317 | 0,00022 |
| R09 | -0,03385 | -0,11649 | -0,01414 | 0,10696 | -0,00630 | 0,00163 | 0,00057 | 0,00115 | -0,00343 | -0,00015 |
| R10 | -0,03737 | -0,01810 | -0,00361 | 0,00992 | 0,00262 | -0,00057 | 0,00041 | 0,00099 | -0,00024 | -0,00012 |
| R11 | -0,04048 | -0,02644 | 0,00196 | 0,00797 | -0,00828 | -0,00095 | 0,00019 | 0,00078 | -0,00060 | 0,00014 |
| R12 | -0,02123 | -0,02190 | -0,02474 | 0,06347 | 0,00570 | -0,00048 | -0,00037 | 0,00002 | -0,00164 | -0,00005 |
| R13 | -0,05098 | -0,02380 | -0,00467 | 0,00390 | 0,00851 | 0,00062 | -0,00029 | 0,00132 | -0,00067 | 0,00012 |
| R14 | 0,01795 | -0,02636 | -0,00634 | 0,01922 | -0,00582 | -0,00098 | 0,00030 | 0,00023 | -0,00158 | 0,00002 |
| R15 | -0,08105 | -0,03422 | 0,00397 | 0,02089 | 0,00085 | -0,00046 | 0,00049 | -0,00434 | -0,00096 | -0,00011 |
| R16 | -0,05697 | -0,01115 | 0,00984 | 0,00372 | -0,02404 | -0,00027 | 0,00122 | -0,00007 | -0,00058 | -0,00030 |
| R17 | 0,09090 | -0,02445 | -0,01266 | 0,02840 | -0,00226 | -0,00149 | 0,00022 | 0,00197 | -0,00129 | 0,00007 |
| R18 | 0,06181 | -0,02397 | -0,01881 | 0,01152 | -0,00296 | -0,00198 | -0,00002 | -0,00142 | -0,00078 | -0,00008 |
| R19 | 0,07965 | -0,05688 | -0,00913 | 0,03824 | -0,01085 | -0,00055 | 0,00063 | -0,00139 | -0,00197 | -0,00007 |
| R20 | 0,04423 | -0,03550 | -0,00599 | 0,01895 | -0,00820 | 0,00052 | 0,00191 | -0,00011 | -0,00120 | -0,00005 |
| R21 | 0,06604 | -0,02333 | 0,00265 | 0,03389 | -0,00010 | -0,00101 | -0,00004 | -0,00064 | -0,00135 | 0,00019 |
| R22 | 0,10125 | -0,01596 | -0,00332 | 0,03233 | -0,01320 | -0,00162 | 0,00097 | 0,00133 | -0,00143 | -0,00002 |
| R23 | 0,08882 | 0,02487 | -0,02639 | -0,00706 | 0,01038 | -0,00281 | -0,00070 | 0,00182 | 0,00038 | 0,00014 |
| R24 | 0,04713 | -0,02939 | -0,00337 | -0,00764 | -0,01599 | -0,00262 | 0,00175 | -0,00047 | -0,00082 | -0,00013 |

Таблица 3.9 – Уточненные коэффициенты $A_{nm}^{(3)}$ согласующей МРД k_3 для «бестеневых» сезонов (значения увеличены в 10^7 раз)

| НКА | A_{00} | A_{10} | A_{20} | A_{30} | A_{40} | A_{11} | A_{21} | A_{31} | A_{41} | A_{22} | A_{32} | A_{42} | A_{33} | A_{43} | A_{44} |
|-----|----------|----------|----------|----------|----------|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| R01 | -2,49827 | -0,07194 | 0,56068 | 0,52285 | -0,64881 | -9,02902 | 0,11802 | -0,97114 | -0,09787 | -0,01284 | -0,00195 | -0,00474 | -0,09307 | 0,00119 | 0,00008 |
| R02 | -2,76024 | 0,01668 | 0,50582 | 0,05122 | -0,63290 | -4,99478 | -0,27675 | -1,17061 | 0,01168 | -0,05288 | -0,00304 | -0,00337 | -0,08045 | 0,00001 | 0,00038 |
| R03 | -2,28276 | 0,05530 | 0,21865 | -0,01824 | -1,26400 | -8,68097 | 0,03014 | -1,07405 | -0,06611 | -0,04190 | -0,00297 | -0,00360 | -0,10220 | 0,00031 | 0,00034 |
| R04 | -2,41340 | 0,04104 | 0,04703 | -0,01323 | -0,87232 | -7,00108 | 0,05425 | -0,87153 | -0,07041 | -0,05558 | -0,00182 | -0,00291 | -0,08851 | 0,00064 | 0,00019 |
| R05 | -2,65476 | -0,00213 | -0,21347 | -0,01026 | 0,30373 | -4,11015 | -0,01415 | -0,68775 | -0,13854 | -0,06583 | -0,00206 | -0,00281 | -0,07647 | -0,00012 | 0,00036 |
| R06 | -2,94705 | 0,01326 | -0,94843 | 0,05828 | -1,15307 | 2,73930 | -0,92864 | -0,84934 | 0,41061 | -0,04084 | -0,00059 | -0,00309 | -0,04194 | -0,00038 | 0,00071 |
| R07 | -3,09328 | 0,06436 | -0,13517 | -0,02762 | -0,93236 | -9,47246 | -0,01044 | -1,12284 | -0,01923 | -0,04399 | -0,00258 | -0,00345 | -0,10572 | 0,00064 | 0,00037 |
| R08 | -2,51042 | -0,02055 | 0,49948 | 0,06630 | -1,90740 | -7,48234 | -0,03495 | -0,96676 | 0,02050 | -0,05773 | -0,00201 | -0,00310 | -0,09434 | 0,00074 | 0,00027 |
| R09 | -0,19413 | 0,09507 | 1,79267 | -0,24577 | -1,70512 | -17,80790 | 0,00998 | -2,30270 | 0,17709 | 0,14152 | -0,00099 | 0,00248 | -0,07992 | -0,00021 | -0,00088 |
| R10 | -2,70105 | -0,16915 | 0,08690 | -0,23470 | 1,48965 | -1,76913 | 0,22753 | -0,75254 | 0,02589 | 0,00875 | 0,00206 | -0,00640 | -0,04523 | 0,00025 | 0,00109 |
| R11 | -3,07677 | -0,15144 | -0,31110 | -0,31096 | 0,74770 | -3,38003 | 0,04894 | -1,24186 | 0,06453 | 0,02197 | -0,00157 | -0,00642 | -0,04881 | 0,00010 | 0,00067 |
| R12 | -3,01458 | -0,06351 | -0,47396 | -0,65530 | 0,18742 | -25,51872 | 0,76115 | -3,57689 | -0,24275 | -0,04305 | -0,00188 | -0,00271 | -0,07198 | -0,00006 | 0,00048 |
| R13 | -2,80747 | -0,14772 | 0,42312 | -0,44475 | 0,68851 | -1,94704 | -0,14520 | -0,68435 | -0,08160 | -0,03221 | 0,00000 | -0,00272 | -0,04843 | -0,00010 | 0,00057 |
| R14 | -2,59333 | 0,04259 | -0,00319 | 0,00441 | 0,23652 | -5,22047 | -0,09097 | -1,10826 | -0,04388 | -0,03829 | -0,00092 | -0,00320 | -0,06576 | 0,00006 | 0,00054 |
| R15 | -3,01209 | -0,14367 | -0,02589 | -0,26877 | 0,86883 | -7,30185 | -2,31326 | -1,34011 | 0,23583 | -0,13632 | 0,00365 | 0,00276 | -0,05532 | -0,00122 | 0,00055 |
| R16 | -1,86432 | -0,14629 | 0,04371 | -0,02732 | 0,82694 | -2,95677 | -0,79352 | -0,87663 | -0,06331 | -0,02295 | -0,00243 | -0,00378 | -0,05026 | -0,00034 | 0,00045 |
| R17 | -2,95089 | 0,21332 | -0,46761 | 0,11277 | 1,08141 | -8,78912 | 0,49608 | -1,46875 | -0,14863 | -0,03590 | -0,00063 | -0,00272 | -0,06217 | 0,00015 | 0,00063 |
| R18 | -2,21826 | 0,20637 | -0,80066 | 0,22104 | 1,27504 | -3,64766 | -0,09438 | -1,12571 | -0,25396 | -0,02611 | -0,00169 | -0,00324 | -0,04908 | -0,00028 | 0,00085 |
| R19 | -2,84173 | 0,21436 | 0,22055 | -0,25128 | 0,01843 | -12,12932 | 0,08207 | -1,97778 | -0,10472 | -0,03271 | -0,00375 | -0,00322 | -0,07153 | -0,00046 | 0,00034 |
| R20 | -2,41947 | 0,27762 | 0,08062 | 0,32636 | 1,18911 | -6,13291 | 0,41578 | -1,18258 | -0,05933 | -0,04043 | 0,00217 | -0,00180 | -0,06082 | -0,00004 | 0,00074 |
| R21 | -1,70215 | 0,15487 | 0,73007 | -0,02670 | 0,97575 | -8,21246 | 0,30537 | -1,58764 | -0,11517 | -0,03973 | -0,00111 | -0,00276 | -0,06423 | -0,00030 | 0,00081 |
| R22 | -2,09243 | 0,15621 | 0,21627 | 0,08847 | 0,75157 | -9,89166 | 0,36829 | -1,55301 | -0,19389 | -0,04546 | -0,00120 | -0,00219 | -0,06751 | -0,00003 | 0,00057 |
| R23 | -2,99771 | 0,11278 | -0,97604 | -0,01434 | 1,22903 | 5,02166 | 0,23742 | -0,32573 | -0,17299 | -0,01199 | -0,00012 | -0,00456 | -0,02685 | 0,00039 | 0,00072 |
| R24 | -2,61541 | 0,22116 | 0,17854 | 0,29345 | 0,93198 | -0,46200 | 0,31692 | -1,44282 | -0,10472 | -0,03930 | 0,00226 | -0,00305 | -0,04811 | 0,00002 | 0,00061 |

Таблица 3.10 – Уточненные коэффициенты $B_{nm}^{(3)}$ согласующей МРД κ_3 для «бестеневых» сезонов (значения увеличены в 10^7 раз)

| НКА | B_{11} | B_{21} | B_{31} | B_{41} | B_{22} | B_{32} | B_{42} | B_{33} | B_{43} | B_{44} |
|-----|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| R01 | 1,19374 | 0,17136 | -0,04699 | 0,01390 | 0,03459 | 0,06236 | -0,00548 | 0,00759 | -0,00031 | -0,00117 |
| R02 | 1,13311 | -0,09342 | -0,01188 | -0,02992 | 0,02893 | 0,05032 | -0,00075 | 0,01005 | -0,00024 | -0,00116 |
| R03 | 1,26463 | -0,14066 | -0,03709 | 0,03648 | 0,00071 | 0,05237 | -0,00075 | 0,01119 | -0,00027 | -0,00171 |
| R04 | 1,18549 | -0,06319 | -0,07103 | 0,02138 | 0,04627 | 0,05771 | -0,00291 | 0,01153 | -0,00013 | -0,00038 |
| R05 | 1,19381 | -0,03859 | -0,03171 | 0,00255 | 0,06691 | 0,05133 | -0,00330 | 0,00697 | -0,00035 | -0,00045 |
| R06 | 1,53100 | -0,50257 | -0,04606 | 0,21548 | -0,10201 | 0,05657 | 0,00146 | 0,01182 | 0,00011 | 0,00010 |
| R07 | 1,25045 | -0,08210 | -0,05714 | 0,03379 | 0,03918 | 0,06088 | -0,00231 | 0,00745 | -0,00001 | -0,00184 |
| R08 | 1,56140 | -0,06623 | -0,06946 | 0,05720 | 0,01783 | 0,04707 | -0,00092 | 0,00844 | -0,00016 | -0,00146 |
| R09 | 0,96366 | 0,11143 | 0,01759 | -0,06320 | 0,00800 | 0,00848 | 0,00415 | 0,00169 | -0,00008 | 0,00102 |
| R10 | 1,41734 | 0,10315 | -0,10265 | -0,04665 | 0,02238 | 0,02717 | 0,00044 | 0,00608 | 0,00002 | -0,00131 |
| R11 | 1,26762 | -0,07489 | -0,07156 | -0,04942 | 0,01150 | 0,02704 | 0,00037 | 0,00428 | 0,00028 | -0,00028 |
| R12 | 1,23142 | -0,15760 | 0,05177 | 0,03705 | 0,00708 | 0,02543 | 0,00012 | 0,00531 | 0,00018 | 0,00026 |
| R13 | 1,37984 | -0,06103 | -0,13153 | 0,05840 | -0,01761 | 0,03216 | 0,00204 | 0,00636 | 0,00009 | 0,00004 |
| R14 | 1,19509 | -0,07827 | -0,06320 | 0,01429 | 0,00291 | 0,03896 | -0,00008 | 0,00719 | -0,00002 | -0,00039 |
| R15 | 1,27009 | 0,12039 | -0,08981 | -0,08092 | 0,02139 | 0,01264 | 0,00284 | 0,00609 | 0,00005 | -0,00098 |
| R16 | 1,73306 | -0,06714 | -0,28326 | 0,06505 | 0,07080 | 0,01965 | 0,00203 | 0,00775 | 0,00068 | 0,00244 |
| R17 | 1,11639 | 0,03905 | -0,06633 | -0,01509 | -0,00785 | 0,03352 | 0,00013 | 0,00621 | -0,00001 | -0,00006 |
| R18 | 1,01954 | -0,23542 | -0,01748 | -0,00454 | 0,00958 | 0,02985 | -0,00004 | 0,00621 | -0,00015 | -0,00013 |
| R19 | 1,09329 | -0,02042 | -0,08977 | -0,06347 | -0,01041 | 0,03448 | 0,00256 | 0,00823 | 0,00007 | 0,00036 |
| R20 | 1,11859 | -0,05430 | -0,01963 | -0,02007 | -0,09115 | 0,03169 | 0,00104 | 0,00342 | -0,00033 | -0,00051 |
| R21 | 0,94551 | -0,23019 | -0,07259 | -0,03710 | -0,01134 | 0,03377 | -0,00085 | 0,00595 | 0,00022 | -0,00010 |
| R22 | 0,98880 | -0,06114 | -0,04964 | -0,00656 | -0,00814 | 0,03247 | 0,00091 | 0,00541 | 0,00019 | 0,00017 |
| R23 | 0,85146 | -0,13928 | -0,00980 | 0,07920 | -0,00992 | 0,03229 | 0,00142 | 0,00442 | 0,00004 | 0,00039 |
| R24 | 0,58180 | -0,14698 | 0,04819 | 0,07039 | -0,05045 | 0,03275 | 0,00046 | 0,00557 | -0,00012 | -0,00018 |

Привести все графические результаты уточнения коэффициентов согласующей модели не представляется возможным из-за большого объема, однако можно отметить характерные моменты. На рисунках 3.5 – 3.13 приведены несколько результатов определения коэффициентов κ_1 НКА №R08 для «световой» модели. Результаты для других НКА и коэффициентов аналогичны представленным (см. приложение А).

Красные точки – результаты определения промежуточных коэффициентов $C_m^{(i)}(\gamma)$ и $D_m^{(i)}(\gamma)$ на первом этапе разработанной методики. Желтая линия – восстановленная зависимость с использованием уточненных конечных коэффициентов $A_{nm}^{(i)}, B_{nm}^{(i)}$. Разрывы желтой линии соответствуют «теневым» сезонам, где использовалась «теньевая» модель.

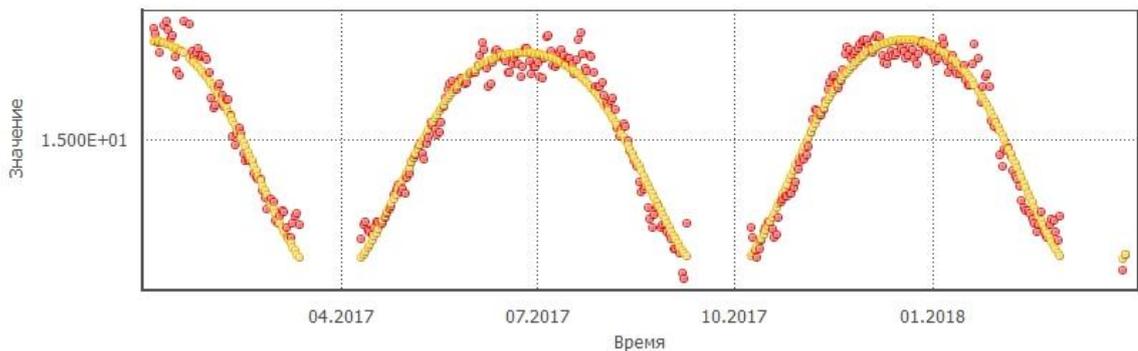


Рисунок 3.5 – Реализации определения промежуточного коэффициента $C_0^{(1)}(\gamma)$ и построенная по ним модель с использованием уточненных коэффициентов $A_{00}^{(1)}, A_{10}^{(1)}, A_{20}^{(1)}, A_{30}^{(1)}, A_{40}^{(1)}$ НКА №R08 для «бестеневых» сезонов

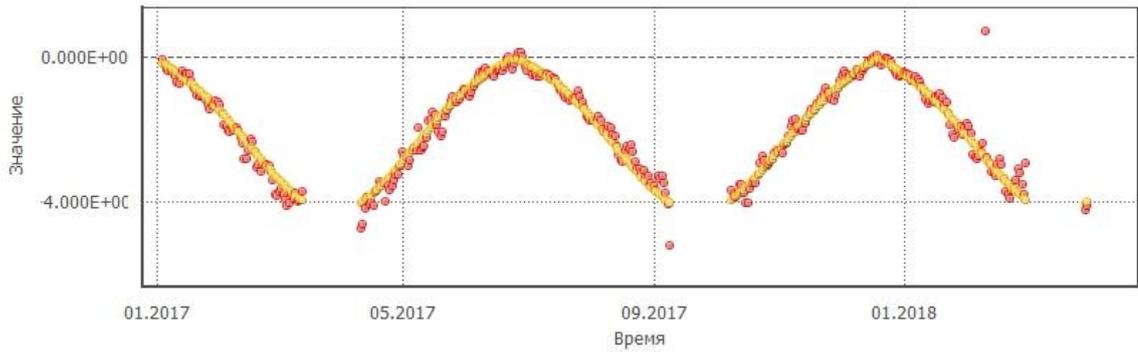


Рисунок 3.6 – Реализации определения промежуточного коэффициента $C_1^{(1)}(\gamma)$ и построенная по ним модель с использованием уточненных коэффициентов $A_{11}^{(1)}, A_{21}^{(1)}, A_{31}^{(1)}, A_{41}^{(1)}$ НКА №R08 для «бестеневых» сезонов

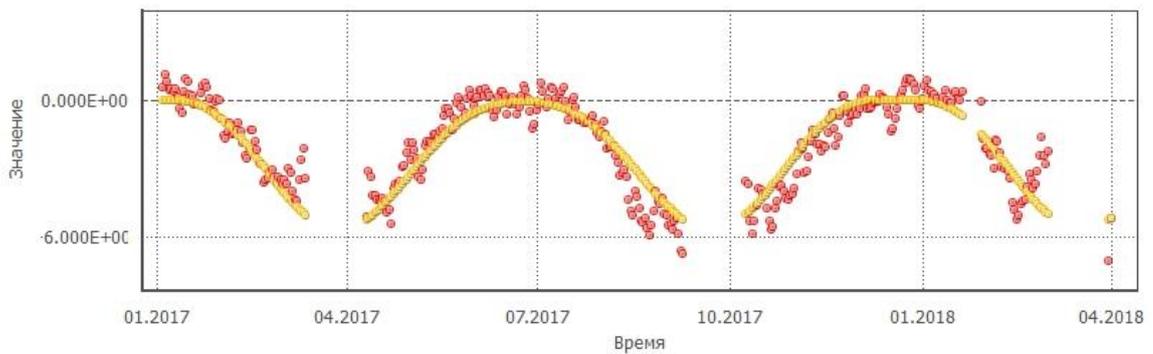


Рисунок 3.7 – Реализации определения промежуточного коэффициента $C_2^{(1)}(\gamma)$ и построенная по ним модель с использованием уточненных коэффициентов $A_{22}^{(1)}, A_{32}^{(1)}, A_{42}^{(1)}$ НКА №R08 для «бестеневых» сезонов

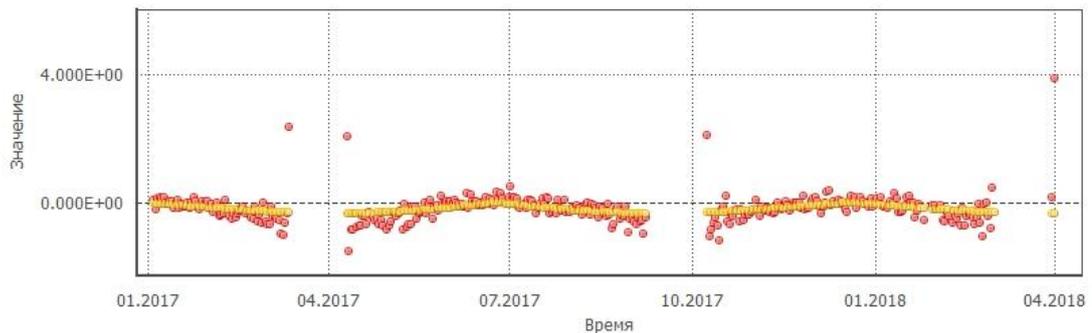


Рисунок 3.8 – Реализации определения промежуточного коэффициента $C_3^{(1)}(\gamma)$ и построенная по ним модель с использованием уточненных коэффициентов $A_{33}^{(1)}, A_{43}^{(1)}$ НКА №R08 для «бестеневых» сезонов

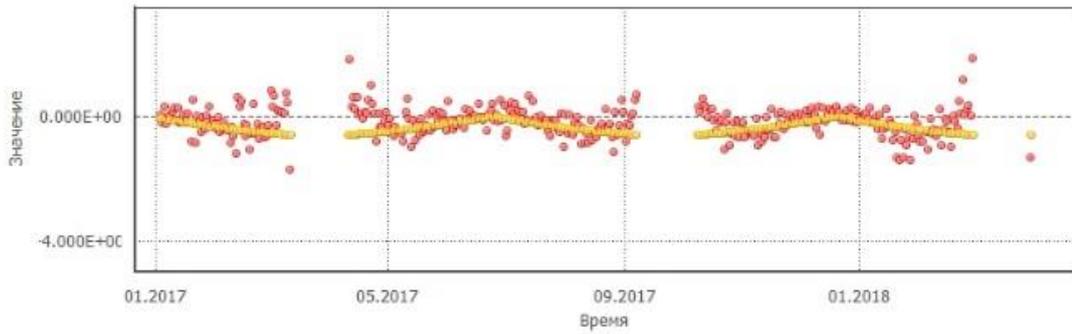


Рисунок 3.9 – Реализации определения промежуточного коэффициента $C_4^{(1)}(\gamma)$ и построенная по ним модель с использованием уточненного коэффициента $A_{44}^{(1)}$ НКА №R08 для «бестеневых» сезонов

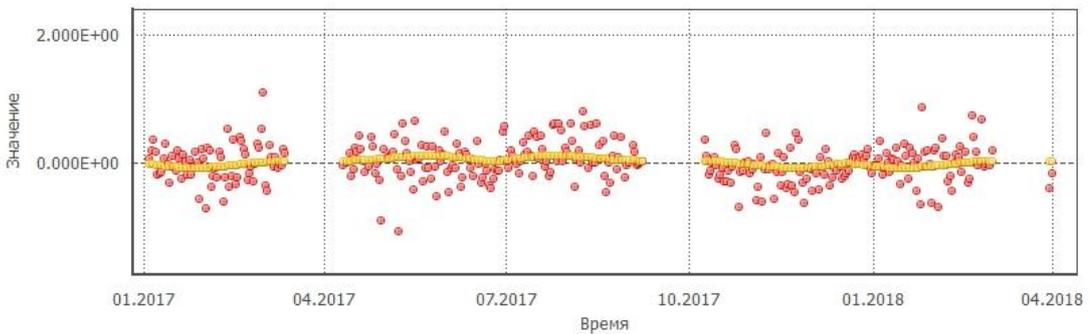


Рисунок 3.10 – Реализации определения промежуточного коэффициента $D_1^{(1)}(\gamma)$ и построенная по ним модель с использованием уточненных коэффициентов $B_{11}^{(1)}, B_{21}^{(1)}, B_{31}^{(1)}, B_{41}^{(1)}$ НКА №R08 для «бестеневых» сезонов

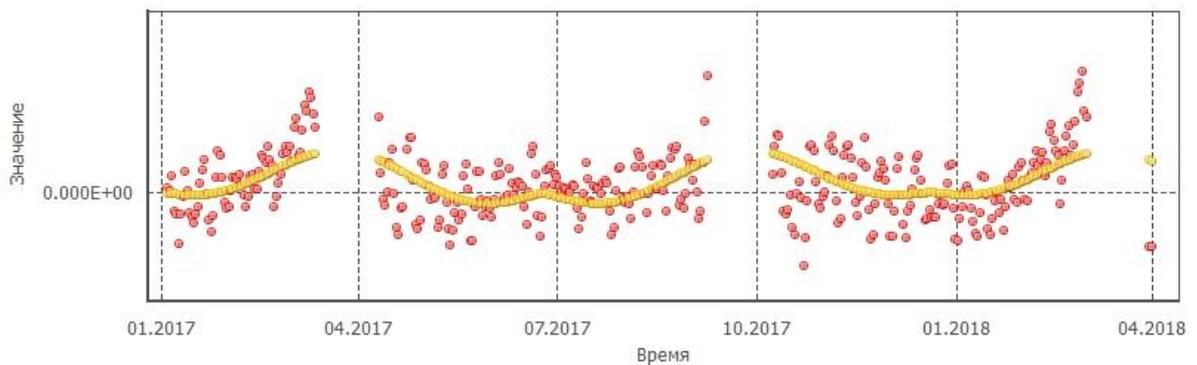


Рисунок 3.11 – Реализации определения промежуточного коэффициента $D_2^{(1)}(\gamma)$ и построенная по ним модель с использованием уточненных коэффициентов $B_{22}^{(1)}, B_{32}^{(1)}, B_{42}^{(1)}$ НКА №R08 для «бестеневых» сезонов

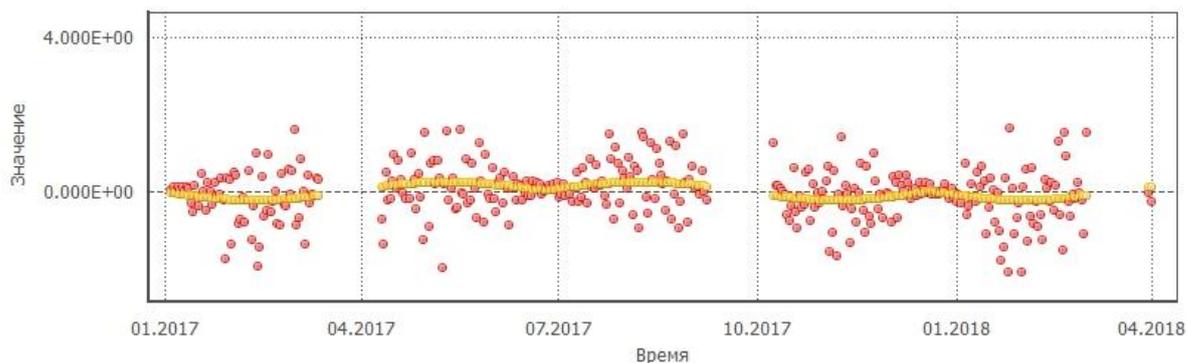


Рисунок 3.12 – Реализации определения промежуточного коэффициента $D_3^{(1)}(\gamma)$ и построенная по ним модель с использованием уточненных коэффициентов $B_{33}^{(1)}, B_{43}^{(1)}$ НКА №R08 для «бестеневых» сезонов

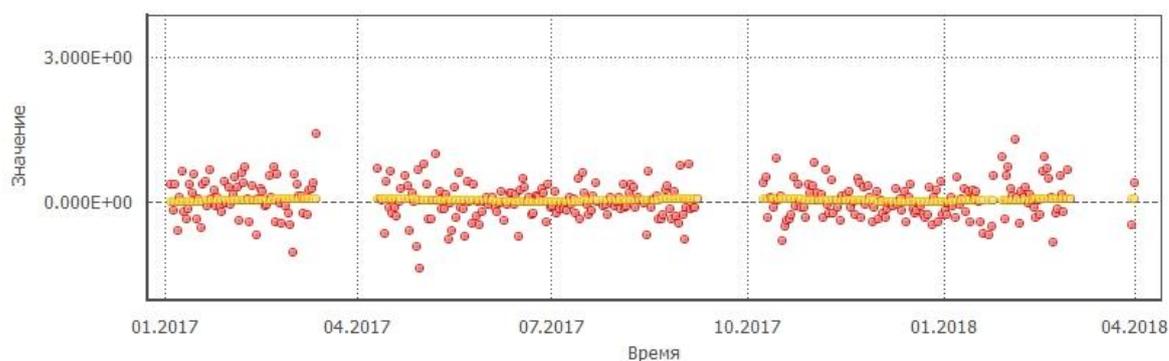


Рисунок 3.13 – Реализации определения промежуточного коэффициента $D_4^{(1)}(\gamma)$ и построенная по ним модель с использованием уточненного коэффициента $B_{44}^{(1)}$ НКА №R08 для «бестеневых» сезонов

Анализируя результаты можно отметить 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.

3.2.2. Согласующая модель радиационного давления для «теневого» сезонов

При отработке уточнения коэффициентов модели (2.1) для «теневого» сезонов было установлено, что количество реализаций в выборках промежуточных коэффициентов $C_m^{(i)}(\gamma)$ и $D_m^{(i)}(\gamma)$, при их нестабильном поведении, является недостаточным для полноценного определения полного набора конечных параметров модели (2.1) $A_{nm}^{(i)}, B_{nm}^{(i)}$, поэтому для «теневого» сезонов определялся неполный состав коэффициентов модели $A_{nm}^{(i)}, B_{nm}^{(i)}$. В соответствии с проведенным анализом по определению оптимального порядка и степени модели (2.1) в п.2.1, степень и порядок были приняты:

- для κ_1 $m = n = 2$;
- для κ_2, κ_3 $m = n = 4$.

В таблице 3.11 – 3.14 приведены коэффициенты модели, которые подлежали уточнению для $\kappa_1, \kappa_2, \kappa_3$ соответственно.

Таблица 3.11 – Состав коэффициентов согласующей МРД κ_1 для «теневого» сезонов

| n | m | | | | |
|-----|------------------|------------------|------------------|---|---|
| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 |
| 0 | $A_{00}(C_{00})$ | - | - | - | - |
| 1 | A_{10} | $A_{11}(C_{11})$ | - | - | - |
| 2 | - | A_{21} | $A_{22}(C_{22})$ | - | - |
| 3 | - | - | - | - | - |
| 4 | - | - | - | - | - |

Таблица 3.12 – Состав коэффициентов согласующей МРД κ_1 для «теневых» сезонов

| n | m | | | | |
|-----|-----|------------------|------------------|---|---|
| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 |
| 0 | - | - | - | - | - |
| 1 | - | $B_{11}(D_{11})$ | - | - | - |
| 2 | - | B_{21} | $B_{22}(D_{22})$ | - | - |
| 3 | - | - | - | - | - |
| 4 | - | - | - | - | - |

Таблица 3.13 – Состав коэффициентов согласующей МРД κ_2, κ_3 для «теневых» сезонов

| n | m | | | | |
|-----|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 |
| 0 | $A_{00}(C_{00})$ | - | - | - | - |
| 1 | A_{10} | $A_{11}(C_{11})$ | - | - | - |
| 2 | - | A_{21} | $A_{22}(C_{22})$ | - | - |
| 3 | - | - | A_{32} | $A_{33}(C_{33})$ | - |
| 4 | - | - | - | A_{43} | $A_{44}(C_{44})$ |

Таблица 3.14 – Состав коэффициентов согласующей МРД κ_2, κ_3 для «теневых» сезонов

| n | m | | | | |
|-----|-----|------------------|------------------|------------------|------------------|
| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 |
| 0 | - | - | - | - | - |
| 1 | - | $B_{11}(D_{11})$ | - | - | - |
| 2 | - | B_{21} | $B_{22}(D_{22})$ | - | - |
| 3 | - | - | B_{32} | $B_{33}(D_{33})$ | - |
| 4 | - | - | - | B_{43} | $B_{44}(D_{44})$ |

В результате реализации методик, приведенных в п. 2.2, были получены наборы коэффициентов согласующей МРД (2.1) по всем НКА штатной ОГ ГЛОНАСС на 01.07.2018 (таблицы 3.15 – 3.17). Привести все графические результаты уточнения коэффициентов согласующей модели не представляется возможным из-за большого объема, однако можно отметить характерные моменты.

Таблица 3.15 – Уточненные коэффициенты $A_{nm}^{(1)}$, $B_{nm}^{(1)}$ согласующей МРД κ_1 для «теневого сезона» (значения увеличены в 10^7 раз)

| НКА | A_{00} | A_{10} | A_{11} | A_{21} | A_{22} | A_{32} | A_{33} | A_{43} | A_{44} | B_{11} | B_{21} | B_{22} | B_{32} | B_{33} | B_{43} | B_{44} |
|-----|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| R01 | 9,57374 | -2,16865 | 0,21799 | 0,13857 | -2,63714 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,06129 | 0,08735 | 0,50857 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 |
| R02 | 11,59857 | 1,73809 | -0,25996 | 1,24761 | -0,65774 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,48523 | -0,05004 | 0,14020 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 |
| R03 | 12,18308 | -1,07263 | -1,37196 | -0,45961 | -1,39973 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,13564 | -0,11725 | 0,25319 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 |
| R04 | 11,26045 | -1,28539 | -0,98875 | -0,85406 | -1,17205 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,16073 | -0,21936 | 0,17539 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 |
| R05 | 11,81779 | 2,49469 | -1,07377 | 2,62390 | -0,72942 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,14228 | 0,06935 | -0,02114 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 |
| R06 | 14,48610 | -2,05663 | -2,69815 | -0,54158 | 0,78233 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,34216 | 0,27755 | 0,05672 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 |
| R07 | 11,21881 | -0,18386 | -1,48760 | -0,32482 | -1,57961 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,36157 | 0,00721 | 0,22249 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 |
| R08 | 12,81809 | -1,64789 | -0,48356 | -0,77231 | -1,10840 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,17320 | -0,09189 | 0,26079 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 |
| R09 | -4,18768 | -1,96509 | 2,80562 | 1,02636 | -4,24294 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | -0,07183 | 0,16218 | 0,01620 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 |
| R10 | 13,29015 | 4,96316 | -0,59499 | -2,08426 | -0,32583 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,22625 | 0,10108 | -0,04660 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 |
| R11 | 11,63971 | -0,64483 | -0,62544 | -0,42129 | -0,55889 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,08182 | -0,14874 | 0,05908 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 |
| R12 | 7,32357 | -0,30970 | -5,62228 | -1,03278 | -4,46862 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,02413 | -0,01723 | 1,43046 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 |
| R13 | 12,53323 | -1,33583 | -0,29971 | 0,18008 | -0,35788 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,05465 | -0,06139 | 0,09231 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 |
| R14 | 11,46618 | 0,05717 | -1,16822 | 0,26495 | -0,88054 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,14941 | -0,00001 | 0,14941 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 |
| R15 | 10,57134 | -4,71036 | -2,50715 | -0,71354 | -1,04383 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,20111 | -0,00627 | 0,03207 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 |
| R16 | 11,69572 | 1,98968 | -0,51595 | 1,37203 | -0,02665 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,06636 | 0,02942 | -0,05666 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 |
| R17 | 9,85874 | 0,94379 | -4,90172 | -0,28099 | -1,21863 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,06587 | -0,00817 | 0,24163 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 |
| R18 | 11,36325 | -0,04757 | -0,59859 | 1,14749 | -0,43000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,07431 | 0,06749 | 0,13296 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 |
| R19 | 10,00168 | 0,48617 | -1,44654 | 0,60548 | -2,50008 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,17677 | -0,00326 | 0,34116 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 |
| R20 | 11,19609 | 0,58538 | -2,50122 | 1,28671 | -1,31416 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,14818 | 0,05784 | 0,06719 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 |
| R21 | 10,12616 | -1,69026 | -2,36689 | 0,94577 | -1,49129 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,04736 | -0,05373 | 0,12714 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 |
| R22 | 11,81542 | -0,05659 | -0,78017 | 1,50858 | -1,48359 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,05426 | 0,07947 | 0,14648 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 |
| R23 | 9,67786 | 1,39142 | -0,25264 | 0,92364 | 0,85640 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,18958 | 0,03825 | -0,32549 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 |
| R24 | 12,06388 | 3,50878 | 1,00423 | 0,03661 | -0,09510 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | -0,11104 | -0,05521 | -0,10148 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 |

Таблица 3.16 – Уточненные коэффициенты $A_{nm}^{(2)}$, $B_{nm}^{(2)}$ согласующей МРД κ_2 для «теневого сезона» (значения увеличены в 10^7 раз)

| НКА | A_{00} | A_{10} | A_{11} | A_{21} | A_{22} | A_{32} | A_{33} | A_{43} | A_{44} | B_{11} | B_{21} | B_{22} | B_{32} | B_{33} | B_{43} | B_{44} |
|-----|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| R01 | 0,13726 | 1,17987 | 0,54807 | -0,17511 | -0,09411 | -0,00257 | 0,01461 | -0,00228 | -0,00041 | 0,06301 | 0,40784 | -0,01179 | -0,01864 | 0,00029 | 0,01073 | -0,00021 |
| R02 | 0,10538 | 1,05296 | -0,35478 | 0,12397 | -0,00098 | 0,04242 | -0,00701 | -0,00103 | -0,00090 | -0,03331 | 0,46772 | 0,00480 | -0,04449 | 0,00012 | 0,00797 | -0,00067 |
| R03 | 0,09426 | 0,94474 | 0,13879 | 0,13009 | -0,03028 | 0,05366 | 0,00215 | 0,00028 | 0,00025 | 0,04991 | 0,32381 | -0,00036 | -0,05688 | 0,00331 | 0,00822 | -0,00011 |
| R04 | 0,08843 | -0,30258 | 0,11563 | -0,04996 | -0,03408 | 0,02615 | 0,00767 | -0,00209 | -0,00038 | 0,02859 | 0,21229 | -0,00875 | -0,04569 | -0,00650 | 0,00323 | 0,00145 |
| R05 | -0,22045 | 0,83998 | -0,03073 | -0,72357 | 0,01467 | 0,06591 | 0,00144 | -0,00452 | 0,00273 | -0,18844 | 0,20935 | 0,01247 | -0,02674 | 0,00145 | 0,00370 | 0,00121 |
| R06 | 0,28530 | 1,28698 | 0,37040 | 0,45112 | 0,00255 | 0,02934 | -0,00858 | 0,00150 | 0,00128 | -0,04259 | 0,20132 | 0,02906 | -0,02590 | 0,00538 | 0,01152 | -0,00072 |
| R07 | 0,19618 | 2,00238 | 0,21384 | 0,41658 | -0,02182 | 0,07039 | 0,00121 | 0,00135 | 0,00030 | -0,10160 | 0,36111 | -0,00033 | -0,05704 | -0,00632 | 0,01116 | -0,00141 |
| R08 | 0,38453 | 0,26526 | 0,12024 | 0,16680 | -0,02244 | 0,01807 | 0,00281 | 0,00149 | -0,00060 | -0,03409 | 0,57319 | -0,00397 | -0,06161 | -0,00250 | 0,01007 | 0,00018 |
| R09 | -0,50507 | -0,75470 | 0,77845 | 0,14487 | -0,16933 | -0,04818 | 0,01159 | -0,00090 | -0,00257 | -0,08447 | 0,17107 | 0,00575 | -0,10861 | 0,00235 | 0,00899 | -0,00122 |
| R10 | 0,09611 | 0,23377 | -0,03403 | 0,14088 | -0,10609 | 0,00698 | -0,00421 | 0,00113 | -0,00126 | -0,10685 | 0,43380 | -0,00177 | -0,08392 | 0,00376 | 0,01367 | 0,00025 |
| R11 | 0,03601 | 0,55271 | -0,20212 | -0,28840 | -0,03741 | 0,02885 | -0,00996 | -0,00180 | -0,00107 | -0,05969 | 0,43184 | -0,00999 | -0,07349 | 0,00087 | 0,01290 | 0,00037 |
| R12 | -0,08729 | -0,60475 | 0,23025 | -0,46173 | -0,09136 | 0,03437 | 0,00084 | -0,00147 | -0,00079 | -0,10066 | 0,47146 | 0,01593 | -0,09497 | 0,00238 | 0,00831 | 0,00010 |
| R13 | -0,12706 | 0,43495 | -0,25630 | -0,38316 | -0,05386 | 0,01070 | -0,01336 | -0,00284 | -0,00095 | 0,05107 | 0,54319 | -0,01238 | -0,07860 | 0,01623 | 0,00725 | -0,00051 |
| R14 | 0,04801 | 0,77421 | 0,07892 | -0,13029 | -0,05462 | 0,03049 | 0,00045 | -0,00140 | -0,00041 | -0,00317 | 0,36360 | 0,00688 | -0,05468 | 0,00051 | 0,00872 | 0,00049 |
| R15 | -0,05514 | 1,71110 | 0,37421 | -0,48208 | -0,08946 | 0,05013 | 0,00059 | -0,00264 | -0,00176 | -0,07520 | 0,45370 | 0,00552 | -0,07466 | -0,00202 | 0,01098 | 0,00006 |
| R16 | -0,12537 | -0,83467 | 0,38883 | 0,18464 | -0,15226 | 0,00343 | 0,01142 | -0,00275 | -0,00132 | -0,13333 | 0,51178 | 0,00902 | -0,05881 | -0,00217 | 0,00947 | 0,00056 |
| R17 | 0,22609 | 1,20132 | -0,22311 | 0,21184 | -0,05039 | 0,04113 | -0,00677 | 0,00118 | -0,00001 | -0,00500 | 0,36306 | 0,02886 | -0,05372 | -0,00417 | 0,01023 | 0,00130 |
| R18 | -0,17336 | -0,23805 | 0,23619 | -0,10252 | -0,05100 | -0,01308 | 0,01511 | -0,00173 | -0,00056 | 0,10293 | 0,44724 | 0,00147 | -0,04926 | -0,00343 | 0,00884 | 0,00095 |
| R19 | -0,23240 | 2,77127 | -0,06316 | -0,81736 | -0,03101 | 0,11093 | -0,00104 | -0,00401 | 0,00001 | 0,10460 | 0,48277 | 0,00864 | -0,05494 | 0,00476 | 0,00886 | -0,00030 |
| R20 | 0,05707 | 0,60808 | 0,22247 | -0,24189 | -0,08243 | 0,04615 | 0,00383 | -0,00311 | -0,00042 | 0,02594 | 0,27631 | 0,01739 | -0,05008 | -0,00171 | 0,00291 | 0,00278 |
| R21 | 0,17586 | 0,37504 | -0,17179 | -0,21402 | -0,02766 | 0,02550 | -0,00657 | -0,00312 | -0,00014 | 0,05414 | 0,19755 | 0,02027 | -0,07734 | -0,00598 | 0,00891 | 0,00110 |
| R22 | -0,10105 | 0,01540 | -0,00558 | -0,26884 | -0,13685 | -0,02302 | 0,00032 | -0,00361 | -0,00200 | 0,01835 | 0,21893 | 0,01891 | -0,07400 | -0,00009 | 0,00621 | 0,00013 |
| R23 | -0,19291 | 1,34568 | 0,24163 | -0,32124 | -0,08459 | 0,03593 | 0,00248 | 0,00024 | -0,00097 | 0,07905 | 0,26970 | 0,02112 | -0,03917 | 0,00554 | 0,00707 | 0,00221 |
| R24 | 0,35358 | 0,81219 | 0,02870 | -0,49393 | -0,05748 | 0,01324 | 0,00327 | -0,00105 | -0,00045 | 0,13602 | 0,24905 | 0,01627 | -0,04335 | 0,00396 | 0,00926 | 0,00158 |

Таблица 3.17 – Уточненные коэффициенты $A_{nm}^{(3)}$, $B_{nm}^{(3)}$ согласующей МРД κ_3 для «теневого сезона» (значения увеличены в 10^7 раз)

| НКА | A_{00} | A_{10} | A_{11} | A_{21} | A_{22} | A_{32} | A_{33} | A_{43} | A_{44} | B_{11} | B_{21} | B_{22} | B_{32} | B_{33} | B_{43} | B_{44} |
|-----|----------|----------|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| R01 | -4,60750 | -0,73297 | 11,86610 | 1,05596 | -0,91430 | 0,02148 | 0,20890 | 0,00553 | -0,02760 | 2,61530 | 0,45783 | 0,03939 | 0,04739 | 0,00376 | 0,00229 | 0,00004 |
| R02 | -4,50654 | 1,83125 | 7,94092 | -0,24239 | -0,74231 | 0,06724 | 0,17804 | -0,00319 | -0,01943 | 1,64233 | 0,47978 | 0,05128 | 0,00958 | 0,00699 | 0,00131 | -0,00321 |
| R03 | -2,94542 | 1,65142 | 8,39811 | -0,76687 | -0,72519 | 0,04386 | 0,18514 | 0,00122 | -0,02492 | 1,85242 | -0,25428 | -0,01788 | 0,03948 | -0,00195 | 0,00023 | -0,00050 |
| R04 | -2,54300 | 0,23699 | 3,21788 | -0,90646 | -0,11974 | -0,00394 | 0,12146 | -0,00881 | -0,01980 | 1,71343 | -0,03818 | -0,00973 | -0,02276 | -0,00041 | -0,00059 | -0,00024 |
| R05 | -3,47888 | 2,59723 | 8,26035 | -0,87067 | -0,48032 | 0,04258 | 0,13724 | -0,00548 | -0,01097 | 1,62382 | 0,21844 | -0,05520 | 0,01059 | 0,00149 | -0,00120 | 0,00089 |
| R06 | -3,81778 | -0,63460 | 8,71992 | -2,43245 | -0,93386 | 0,16150 | 0,22834 | -0,02306 | -0,02015 | 1,77102 | -1,97062 | 0,02570 | 0,02531 | -0,00286 | 0,00120 | -0,00358 |
| R07 | -4,83153 | 0,03370 | 5,76927 | -0,79788 | -0,96334 | 0,02284 | 0,17565 | -0,00572 | -0,02301 | 1,88152 | -0,39865 | -0,00265 | 0,03063 | -0,00809 | -0,00251 | -0,00338 |
| R08 | -4,14830 | 0,21480 | 7,55062 | 0,20540 | -0,87483 | -0,02191 | 0,18893 | 0,00913 | -0,02494 | 2,04653 | -0,02468 | -0,01617 | -0,02593 | -0,00282 | 0,00026 | -0,00085 |
| R09 | -2,32073 | -1,31611 | -10,07552 | 1,16027 | -0,90365 | 0,00194 | 0,27003 | 0,00534 | -0,02574 | 0,95272 | 0,68005 | 0,01055 | 0,01309 | 0,00555 | 0,00348 | -0,00053 |
| R10 | -4,60943 | -3,24288 | 8,30035 | 2,93318 | -1,10253 | -0,07957 | 0,20811 | 0,01605 | -0,02706 | 1,28110 | 0,44373 | 0,01637 | 0,01942 | 0,00150 | -0,00041 | -0,00146 |
| R11 | -4,66525 | -1,03226 | 8,84405 | 0,47753 | -0,99096 | -0,02756 | 0,18249 | 0,00421 | -0,02411 | 1,58386 | 0,10988 | -0,01703 | 0,00264 | -0,00195 | 0,00373 | -0,00056 |
| R12 | -6,65945 | 7,38438 | 9,93722 | -4,92212 | -1,09207 | 0,07401 | 0,17025 | -0,00955 | -0,02539 | 4,84029 | 0,27018 | -0,03223 | 0,00890 | 0,00409 | 0,00061 | -0,00077 |
| R13 | -4,55105 | -5,36324 | 9,24568 | 1,86198 | -1,05449 | -0,11801 | 0,18861 | 0,01493 | -0,02435 | 1,65657 | -0,16772 | -0,00453 | 0,04802 | 0,00639 | 0,00329 | -0,00068 |
| R14 | -4,17317 | -0,20372 | 8,23743 | 0,19351 | -0,90813 | 0,01793 | 0,18007 | -0,00047 | -0,02345 | 1,60772 | -0,03022 | -0,01026 | 0,02000 | 0,00104 | 0,00084 | -0,00103 |
| R15 | -4,73680 | -0,35914 | 7,86030 | -2,00549 | -1,12714 | -0,00052 | 0,19511 | 0,00187 | -0,02672 | 1,54799 | 0,83024 | -0,02162 | 0,01234 | -0,00177 | -0,00162 | -0,00104 |
| R16 | -4,16487 | -0,71261 | 10,32475 | 4,56574 | -1,36627 | 0,04085 | 0,24585 | 0,00074 | -0,03371 | 1,33420 | -0,66526 | 0,01303 | 0,04378 | 0,00569 | 0,00213 | -0,00024 |
| R17 | -4,58530 | 3,79999 | 7,06764 | -1,70949 | -0,92140 | 0,11005 | 0,16200 | -0,01015 | -0,02278 | 1,80987 | -0,07043 | -0,05610 | 0,02421 | -0,00216 | 0,00064 | -0,00076 |
| R18 | -3,94542 | 0,00084 | 9,08046 | 0,71621 | -0,94253 | 0,01182 | 0,17523 | 0,00379 | -0,02290 | 1,54152 | -0,47752 | 0,01543 | 0,00586 | 0,00406 | -0,00098 | -0,00092 |
| R19 | -5,02183 | 0,06677 | 7,89544 | -0,68914 | -0,91941 | -0,02419 | 0,16295 | 0,00190 | -0,02210 | 2,05579 | -0,24443 | -0,05738 | 0,02317 | -0,00151 | 0,00235 | -0,00169 |
| R20 | -4,24586 | -1,82599 | 8,36989 | 3,19958 | -0,86995 | 0,05845 | 0,16323 | -0,00578 | -0,02027 | 1,44681 | 0,70049 | -0,05816 | 0,00033 | 0,00741 | 0,00188 | -0,00126 |
| R21 | -3,97835 | 0,92883 | 8,83662 | -1,46289 | -1,11370 | 0,04685 | 0,19300 | -0,00848 | -0,02751 | 1,55530 | 0,03182 | 0,00155 | 0,00239 | 0,00368 | 0,00092 | -0,00105 |
| R22 | -4,06593 | 1,59528 | 8,95697 | -2,85453 | -1,02523 | 0,05834 | 0,11958 | -0,01055 | -0,02392 | 1,55781 | 0,08421 | 0,00580 | 0,06031 | 0,00625 | 0,00415 | 0,00007 |
| R23 | -4,21218 | 1,22258 | 8,46416 | 0,57291 | -0,98177 | 0,00158 | 0,18773 | 0,00230 | -0,02318 | 0,54740 | -0,34674 | -0,04099 | 0,05004 | -0,00101 | 0,00214 | -0,00122 |
| R24 | -3,97539 | -4,55422 | 8,01656 | 3,21355 | -0,90147 | -0,03530 | 0,17393 | 0,00958 | -0,02298 | 0,69760 | 0,66748 | -0,02667 | 0,01314 | -0,00094 | -0,00158 | -0,00005 |

На рисунках 3.14 – 3.22 приведены несколько результатов определения коэффициентов κ_1 НКА №R19 для «теневого» модели. Результаты для других НКА и коэффициентов аналогичны представленным (см. приложение А). Красные точки – результаты определения промежуточных коэффициентов $C_m^{(i)}(\gamma)$ и $D_m^{(i)}(\gamma)$ на первом этапе разработанной методики. Желтая линия – восстановленная зависимость с использованием уточненных конечных коэффициентов $A_{nm}^{(i)}, B_{nm}^{(i)}$. Разрывы желтой линии соответствуют «бестеневым» сезонам, где использовалась «световая» модель.

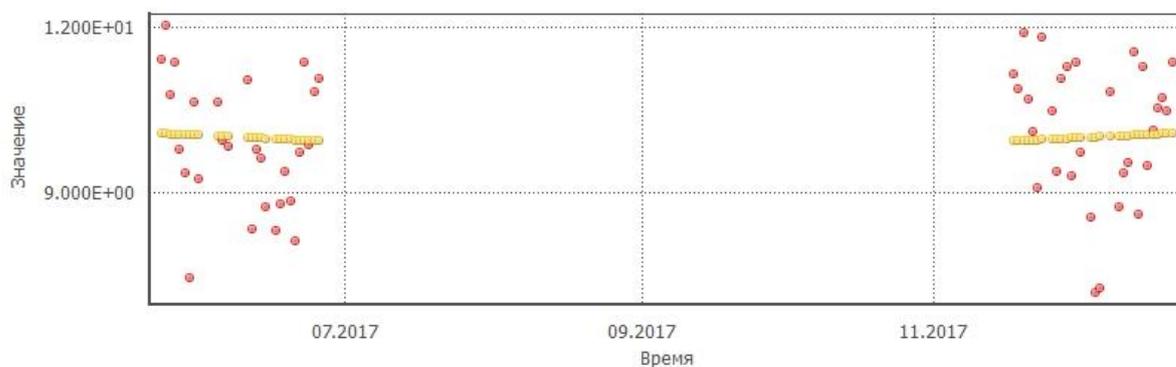


Рисунок 3.14 – Реализации определения промежуточного коэффициента $C_0^{(1)}(\gamma)$ и построенная по ним модель с использованием уточненных коэффициентов $A_{00}^{(1)}, A_{10}^{(1)}$ НКА №R19 для «теневого» сезонов

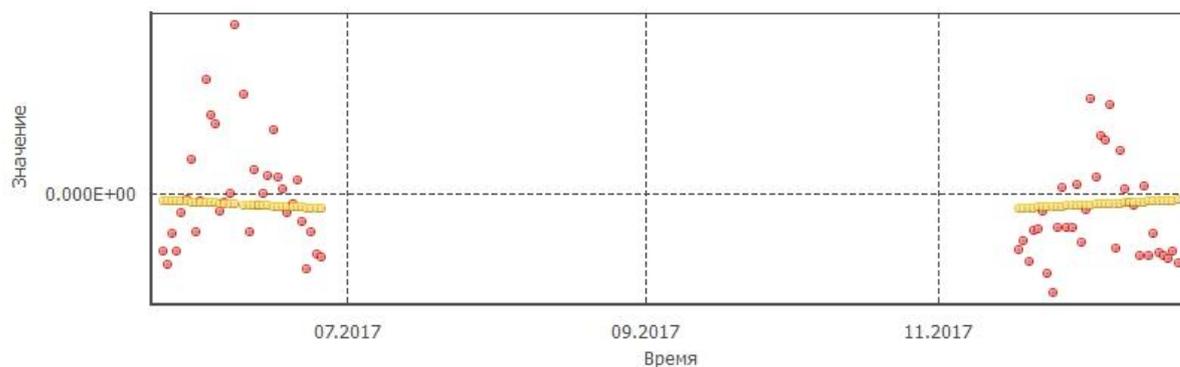


Рисунок 3.15 – Реализации определения промежуточного коэффициента $C_1^{(1)}(\gamma)$ и построенная по ним модель с использованием уточненных коэффициентов $A_{11}^{(1)}, A_{21}^{(1)}$ НКА №R19 для «теневого» сезонов

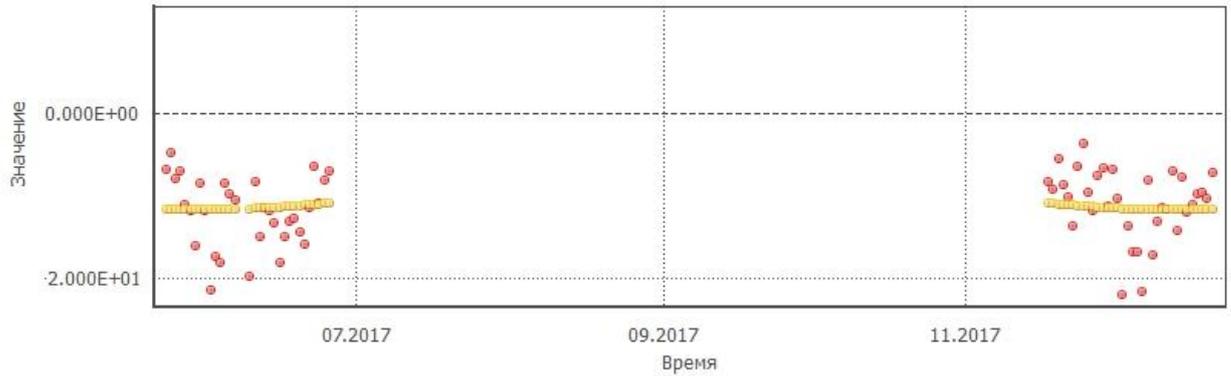


Рисунок 3.16 – Реализации определения промежуточного коэффициента $C_2^{(1)}(\gamma)$ и построенная по ним модель с использованием уточненных коэффициентов $A_{22}^{(1)}, A_{32}^{(1)}$ НКА №R19 для «тневых» сезонов

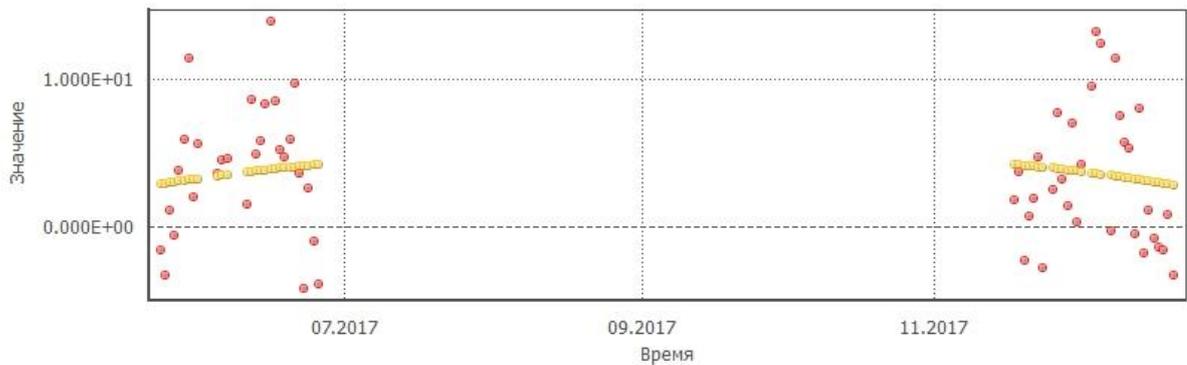


Рисунок 3.17 – Реализации определения промежуточного коэффициента $C_3^{(1)}(\gamma)$ и построенная по ним модель с использованием уточненных коэффициентов $A_{33}^{(1)}, A_{43}^{(1)}$ НКА №R19 для «тневых» сезонов

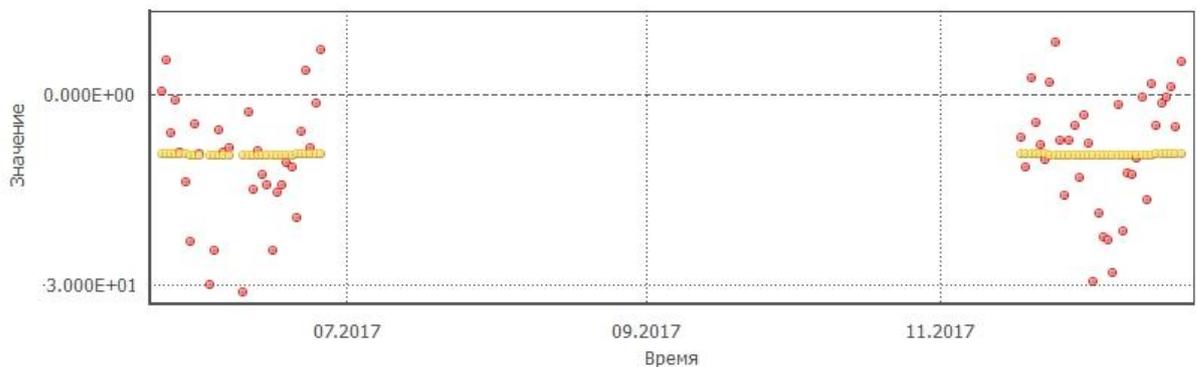


Рисунок 3.18 – Реализации определения промежуточного коэффициента $C_4^{(1)}(\gamma)$ и построенная по ним модель с использованием уточненного коэффициента $A_{44}^{(1)}$ НКА №R19 для «тневых» сезонов



Рисунок 3.19 – Реализации определения промежуточного коэффициента $D_1^{(1)}(\gamma)$ и построенная по ним модель с использованием уточненных коэффициентов $B_{11}^{(1)}, B_{21}^{(1)}$ НКА №R19 для «теневого» сезонов

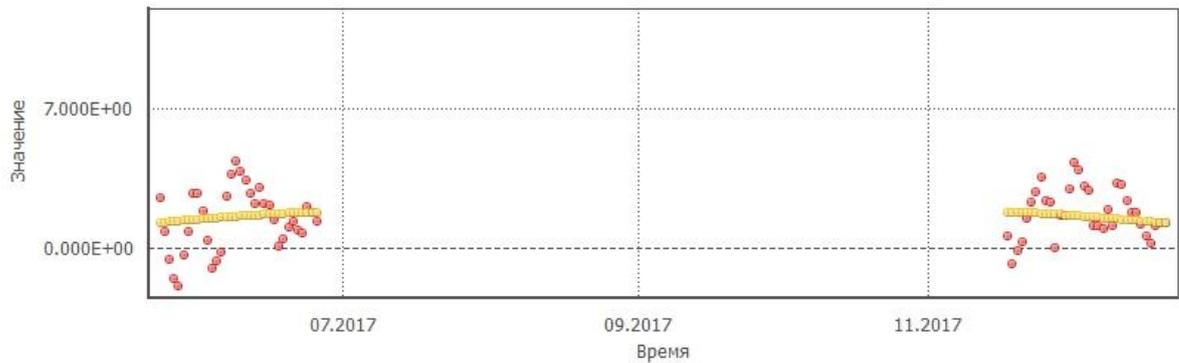


Рисунок 3.20 – Реализации определения промежуточного коэффициента $D_2^{(1)}(\gamma)$ и построенная по ним модель с использованием уточненных коэффициентов $B_{22}^{(1)}, B_{32}^{(1)}$ НКА №R19 для «теневого» сезонов



Рисунок 3.21 – Реализации определения промежуточного коэффициента $D_3^{(1)}(\gamma)$ и построенная по ним модель с использованием уточненных коэффициентов $B_{33}^{(1)}, B_{43}^{(1)}$ НКА №R19 для «теневого» сезонов

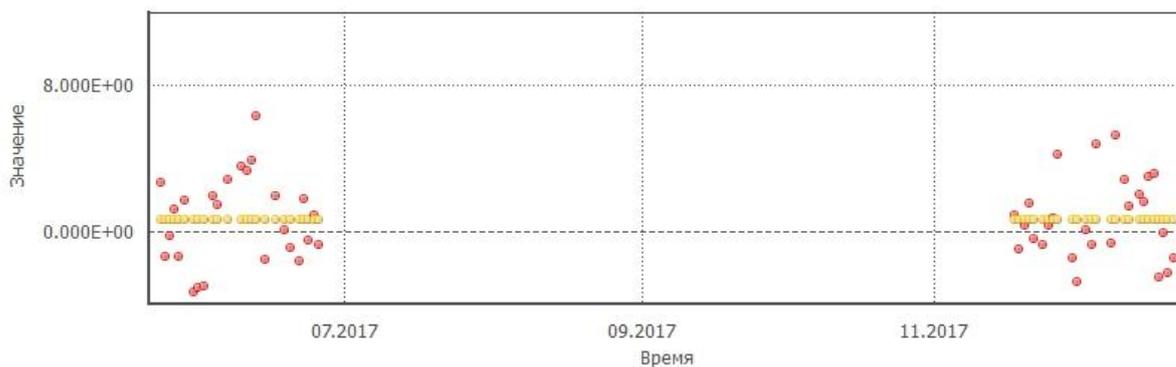


Рисунок 3.22 – Реализации определения промежуточного коэффициента $D_4^{(1)}(\gamma)$ и построенная по ним модель с использованием уточненного коэффициента $B_{44}^{(1)}$ НКА №R19 для «теневого» сезонов

Анализируя результаты можно отметить следующее:

- схожесть значений одноподобных коэффициентов для различных НКА внутри одной модификации («Глонасс-М»), данный факт позволяет использовать средние значения одноподобных коэффициентов для вновь запущенных НКА, по которым еще не накоплено достаточное количество исходных данных;
- различия значений одноподобных коэффициентов для НКА различных модификаций («Глонасс-М» и «Глонасс-К»);
- большой разброс промежуточных коэффициентов обусловлен худшими точностными характеристиками эфемерид НКА на «теневого» сезонах.

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

В таблицах 3.18 – 3.21 и на рисунках 3.23, 3.24 приведены результаты оценки точности 15-ти суточного прогноза эфемерид, при использовании существующей согласующей МРД (1.13) и разработанной согласующей МРД, соответственно. Исходные данные и технология оценки подробно описаны в разделе 3.1.

Таблица 3.18 – Погрешности прогнозирования эфемерид НКА ГЛОНАСС на 15 часов, с использованием существующей согласующей МРД (1.13) на интервале 15.07.2018 – 19.07.2018 (наличие «теневых» сезонов для НКА R13, R14, R15, R16)

| НКА | МО [м] | | | | СКО [м] | | | | dRe [м] | | | |
|------------|-------------|--------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | dR | dL | dN | dRe | dR | dL | dN | dRe | Max | 0,67 | 0,95 | 0,997 |
| R01 | 0,04 | -0,44 | 0,05 | 0,22 | 0,21 | 0,75 | 0,13 | 0,11 | 0,58 | 0,25 | 0,42 | 0,55 |
| R03 | 0,02 | -0,30 | 0,08 | 0,18 | 0,17 | 0,52 | 0,33 | 0,08 | 0,41 | 0,21 | 0,33 | 0,43 |
| R04 | 0,03 | -0,16 | 0,06 | 0,18 | 0,16 | 0,76 | 0,38 | 0,09 | 0,44 | 0,22 | 0,34 | 0,46 |
| R07 | 0,03 | -1,21 | 0,09 | 0,36 | 0,34 | 0,82 | 0,21 | 0,17 | 0,87 | 0,41 | 0,68 | 0,88 |
| R08 | 0,04 | -0,19 | 0,07 | 0,24 | 0,23 | 0,81 | 0,18 | 0,10 | 0,48 | 0,28 | 0,42 | 0,54 |
| R13 | 0,03 | -1,15 | 0,02 | 0,42 | 0,41 | 1,18 | 0,14 | 0,21 | 0,92 | 0,53 | 0,78 | 1,06 |
| R14 | 0,08 | -1,06 | 0,03 | 0,31 | 0,27 | 0,75 | 0,30 | 0,13 | 0,69 | 0,35 | 0,59 | 0,72 |
| R15 | 0,03 | -0,61 | 0,02 | 0,24 | 0,24 | 0,64 | 0,31 | 0,12 | 0,56 | 0,31 | 0,45 | 0,61 |
| R16 | 0,00 | 0,73 | 0,04 | 0,22 | 0,13 | 1,20 | 0,30 | 0,10 | 0,43 | 0,26 | 0,41 | 0,53 |
| R18 | 0,05 | -1,10 | -0,03 | 0,32 | 0,29 | 0,73 | 0,11 | 0,13 | 0,63 | 0,37 | 0,54 | 0,72 |
| R19 | 0,05 | -1,15 | -0,18 | 0,35 | 0,30 | 1,15 | 0,22 | 0,17 | 0,82 | 0,40 | 0,66 | 0,85 |
| R20 | 0,04 | -0,88 | -0,11 | 0,35 | 0,34 | 1,08 | 0,18 | 0,20 | 0,72 | 0,46 | 0,65 | 0,94 |
| R21 | 0,02 | -0,48 | -0,07 | 0,28 | 0,28 | 0,69 | 0,12 | 0,13 | 0,63 | 0,33 | 0,52 | 0,66 |
| R24 | 0,01 | -0,86 | 0,01 | 0,35 | 0,35 | 0,96 | 0,16 | 0,17 | 0,72 | 0,43 | 0,64 | 0,87 |
| ОГ | 0,03 | -0,63 | 0,01 | 0,29 | 0,27 | 0,86 | 0,22 | 0,14 | 0,92 | 0,34 | 0,53 | 0,70 |

Таблица 3.19 – Погрешности прогнозирования эфемерид НКА ГЛОНАСС на 15 часов, с использованием разработанной согласующей МРД на интервале 15.07.2018 – 19.07.2018 (наличие «теневых» сезонов для НКА R13, R14, R15, R16)

| НКА | МО [м] | | | | СКО [м] | | | | dRe [м] | | | |
|------------|--------------|--------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | dR | dL | dN | dRe | dR | dL | dN | dRe | Max | 0,67 | 0,95 | 0,997 |
| R01 | 0,01 | -0,31 | -0,01 | 0,19 | 0,18 | 0,66 | 0,18 | 0,08 | 0,41 | 0,22 | 0,35 | 0,44 |
| R03 | 0,01 | -0,33 | 0,01 | 0,14 | 0,14 | 0,37 | 0,19 | 0,07 | 0,31 | 0,16 | 0,28 | 0,36 |
| R04 | -0,01 | -0,18 | 0,01 | 0,16 | 0,15 | 0,62 | 0,16 | 0,08 | 0,41 | 0,20 | 0,29 | 0,40 |
| R07 | 0,00 | -0,49 | 0,01 | 0,18 | 0,17 | 0,44 | 0,15 | 0,08 | 0,37 | 0,23 | 0,31 | 0,43 |
| R08 | 0,01 | -0,01 | 0,01 | 0,14 | 0,14 | 0,57 | 0,18 | 0,09 | 0,38 | 0,18 | 0,31 | 0,40 |
| R13 | -0,05 | -0,97 | 0,13 | 0,37 | 0,33 | 1,17 | 0,49 | 0,17 | 0,79 | 0,46 | 0,63 | 0,88 |
| R14 | 0,03 | -0,92 | 0,09 | 0,27 | 0,23 | 0,66 | 0,30 | 0,10 | 0,52 | 0,30 | 0,46 | 0,58 |
| R15 | 0,02 | -0,61 | 0,06 | 0,22 | 0,20 | 0,74 | 0,33 | 0,11 | 0,43 | 0,28 | 0,40 | 0,56 |
| R16 | -0,08 | 0,29 | 0,14 | 0,22 | 0,19 | 0,66 | 0,50 | 0,11 | 0,50 | 0,25 | 0,42 | 0,53 |
| R18 | -0,01 | -0,57 | 0,01 | 0,25 | 0,24 | 0,74 | 0,21 | 0,12 | 0,48 | 0,29 | 0,46 | 0,60 |
| R19 | 0,00 | -0,42 | -0,11 | 0,21 | 0,20 | 0,79 | 0,23 | 0,11 | 0,48 | 0,26 | 0,40 | 0,54 |
| R20 | -0,02 | 0,15 | -0,07 | 0,19 | 0,19 | 0,53 | 0,29 | 0,09 | 0,46 | 0,21 | 0,36 | 0,47 |
| R21 | -0,02 | 0,34 | -0,03 | 0,19 | 0,18 | 0,69 | 0,28 | 0,10 | 0,41 | 0,25 | 0,34 | 0,50 |
| R24 | -0,03 | -0,03 | 0,04 | 0,32 | 0,32 | 1,10 | 0,20 | 0,16 | 0,69 | 0,37 | 0,61 | 0,81 |
| ОГ | -0,01 | -0,29 | 0,02 | 0,22 | 0,21 | 0,69 | 0,26 | 0,11 | 0,79 | 0,26 | 0,40 | 0,54 |

Таблица 3.20 – Погрешности прогнозирования эфемерид НКА ГЛОНАСС на 15 часов, с использованием существующей согласующей МРД (1.13) на интервале 01.08.2018 – 31.08.2018

| НКА | МО [м] | | | | СКО [м] | | | | dRe [м] | | | |
|------------|-------------|--------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | dR | dL | dN | dRe | dR | dL | dN | dRe | Max | 0,67 | 0,95 | 0,997 |
| R01 | 0,04 | -0,07 | 0,03 | 0,32 | 0,32 | 1,04 | 0,18 | 0,17 | 0,84 | 0,36 | 0,64 | 0,82 |
| R02 | 0,04 | -0,15 | 0,06 | 0,23 | 0,23 | 0,68 | 0,32 | 0,13 | 0,73 | 0,26 | 0,48 | 0,62 |
| R03 | 0,06 | -0,46 | 0,06 | 0,28 | 0,26 | 0,99 | 0,35 | 0,13 | 0,73 | 0,33 | 0,51 | 0,67 |
| R04 | 0,02 | 0,03 | 0,04 | 0,40 | 0,30 | 3,38 | 0,93 | 0,43 | 2,32 | 0,34 | 1,58 | 1,68 |
| R07 | 0,04 | -0,39 | 0,06 | 0,42 | 0,40 | 1,44 | 0,21 | 0,19 | 0,99 | 0,50 | 0,75 | 1,00 |
| R08 | 0,04 | -0,44 | 0,05 | 0,29 | 0,30 | 1,27 | 0,31 | 0,21 | 1,40 | 0,34 | 0,67 | 0,92 |
| R09 | 0,02 | -0,86 | 0,04 | 0,49 | 0,49 | 1,75 | 0,30 | 0,29 | 1,42 | 0,58 | 1,04 | 1,36 |
| R10 | 0,02 | -0,26 | 0,03 | 0,28 | 0,30 | 1,17 | 0,39 | 0,21 | 0,99 | 0,29 | 0,75 | 0,92 |
| R11 | 0,03 | -0,77 | 0,02 | 0,33 | 0,35 | 1,01 | 0,46 | 0,23 | 0,96 | 0,38 | 0,78 | 1,01 |
| R13 | -0,01 | -0,82 | 0,03 | 0,44 | 0,52 | 2,46 | 0,63 | 0,47 | 2,01 | 0,43 | 1,72 | 1,85 |
| R14 | 0,01 | 0,15 | 0,03 | 0,20 | 0,18 | 0,76 | 0,29 | 0,09 | 0,49 | 0,24 | 0,35 | 0,47 |
| R15 | 0,03 | -0,16 | 0,05 | 0,19 | 0,16 | 0,85 | 0,44 | 0,09 | 0,47 | 0,22 | 0,37 | 0,47 |
| R16 | 0,01 | 0,06 | 0,07 | 0,24 | 0,25 | 0,85 | 0,23 | 0,14 | 0,76 | 0,30 | 0,49 | 0,67 |
| R17 | 0,04 | -0,82 | -0,09 | 0,35 | 0,37 | 1,54 | 0,33 | 0,28 | 1,18 | 0,35 | 0,93 | 1,19 |
| R18 | 0,04 | -0,72 | -0,06 | 0,36 | 0,32 | 1,60 | 0,51 | 0,20 | 0,94 | 0,40 | 0,77 | 0,97 |
| R19 | 0,04 | -0,62 | -0,18 | 0,29 | 0,28 | 1,36 | 0,27 | 0,21 | 0,94 | 0,34 | 0,73 | 0,92 |
| R20 | 0,02 | 0,08 | -0,07 | 0,32 | 0,30 | 1,60 | 0,22 | 0,20 | 1,01 | 0,35 | 0,75 | 0,92 |
| R21 | 0,02 | -0,25 | -0,09 | 0,27 | 0,25 | 1,30 | 0,38 | 0,17 | 0,79 | 0,28 | 0,63 | 0,79 |
| R22 | 0,02 | 0,07 | -0,08 | 0,24 | 0,28 | 1,02 | 0,25 | 0,20 | 1,12 | 0,28 | 0,65 | 0,85 |
| R23 | 0,03 | -0,59 | 0,01 | 0,24 | 0,20 | 0,85 | 0,37 | 0,10 | 0,48 | 0,30 | 0,40 | 0,55 |
| R24 | 0,03 | -1,18 | -0,04 | 0,41 | 0,42 | 1,33 | 0,27 | 0,27 | 1,16 | 0,51 | 0,92 | 1,21 |
| ОГ | 0,03 | -0,39 | 0,00 | 0,31 | 0,31 | 1,35 | 0,36 | 0,21 | 2,32 | 0,35 | 0,76 | 0,95 |

Таблица 3.21 – Погрешности прогнозирования эфемерид НКА ГЛОНАСС на 15 часов, с использованием разработанной согласующей МРД на интервале 01.08.2018 – 31.08.2018

| НКА | МО [м] | | | | СКО [м] | | | | dRe [м] | | | |
|------------|-------------|--------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | dR | dL | dN | dRe | dR | dL | dN | dRe | Max | 0,67 | 0,95 | 0,997 |
| R01 | 0,03 | -0,49 | 0,01 | 0,18 | 0,15 | 0,71 | 0,15 | 0,08 | 0,41 | 0,21 | 0,33 | 0,42 |
| R02 | 0,04 | -0,68 | 0,02 | 0,20 | 0,15 | 0,78 | 0,16 | 0,08 | 0,41 | 0,23 | 0,34 | 0,44 |
| R03 | 0,05 | -1,03 | 0,02 | 0,22 | 0,15 | 0,68 | 0,22 | 0,10 | 0,48 | 0,25 | 0,40 | 0,51 |
| R04 | 0,01 | -0,28 | 0,01 | 0,15 | 0,14 | 0,59 | 0,21 | 0,08 | 0,43 | 0,16 | 0,32 | 0,40 |
| R07 | 0,05 | -0,40 | 0,03 | 0,25 | 0,26 | 0,70 | 0,24 | 0,14 | 0,76 | 0,29 | 0,53 | 0,67 |
| R08 | 0,04 | -0,51 | 0,04 | 0,17 | 0,17 | 0,43 | 0,17 | 0,10 | 0,51 | 0,19 | 0,36 | 0,46 |
| R09 | 0,10 | -1,96 | -0,03 | 0,35 | 0,19 | 0,72 | 0,40 | 0,11 | 0,67 | 0,39 | 0,59 | 0,69 |
| R10 | -0,06 | 0,85 | 0,00 | 0,22 | 0,15 | 0,71 | 0,31 | 0,08 | 0,48 | 0,25 | 0,36 | 0,46 |
| R11 | -0,01 | -0,26 | 0,00 | 0,21 | 0,21 | 0,64 | 0,31 | 0,13 | 0,64 | 0,24 | 0,47 | 0,60 |
| R13 | -0,01 | -0,12 | 0,01 | 0,16 | 0,16 | 0,46 | 0,33 | 0,08 | 0,45 | 0,19 | 0,31 | 0,41 |
| R14 | -0,02 | 0,20 | 0,00 | 0,14 | 0,14 | 0,58 | 0,14 | 0,08 | 0,39 | 0,17 | 0,28 | 0,38 |
| R15 | -0,06 | 0,95 | -0,02 | 0,24 | 0,18 | 0,62 | 0,28 | 0,09 | 0,57 | 0,28 | 0,40 | 0,52 |
| R16 | 0,13 | -1,88 | 0,04 | 0,35 | 0,18 | 1,07 | 0,55 | 0,16 | 0,82 | 0,43 | 0,65 | 0,84 |
| R17 | 0,00 | 0,09 | 0,00 | 0,15 | 0,15 | 0,59 | 0,18 | 0,07 | 0,40 | 0,18 | 0,29 | 0,38 |
| R18 | 0,02 | -0,14 | 0,00 | 0,16 | 0,16 | 0,53 | 0,17 | 0,07 | 0,33 | 0,19 | 0,27 | 0,36 |
| R19 | 0,02 | -0,25 | -0,09 | 0,17 | 0,16 | 0,60 | 0,22 | 0,08 | 0,38 | 0,21 | 0,31 | 0,41 |
| R20 | 0,02 | -0,41 | -0,03 | 0,16 | 0,15 | 0,49 | 0,15 | 0,08 | 0,38 | 0,19 | 0,31 | 0,41 |
| R21 | 0,01 | -0,25 | -0,01 | 0,21 | 0,21 | 0,94 | 0,13 | 0,14 | 0,58 | 0,26 | 0,48 | 0,64 |
| R22 | 0,01 | 0,02 | 0,01 | 0,19 | 0,20 | 0,84 | 0,13 | 0,12 | 0,58 | 0,22 | 0,45 | 0,57 |
| R23 | 0,01 | -0,24 | 0,01 | 0,14 | 0,12 | 0,58 | 0,16 | 0,07 | 0,37 | 0,16 | 0,26 | 0,34 |
| R24 | 0,01 | -0,56 | 0,04 | 0,24 | 0,24 | 0,62 | 0,15 | 0,13 | 0,64 | 0,29 | 0,48 | 0,63 |
| ОГ | 0,02 | -0,35 | 0,00 | 0,20 | 0,17 | 0,66 | 0,23 | 0,10 | 0,82 | 0,24 | 0,39 | 0,50 |

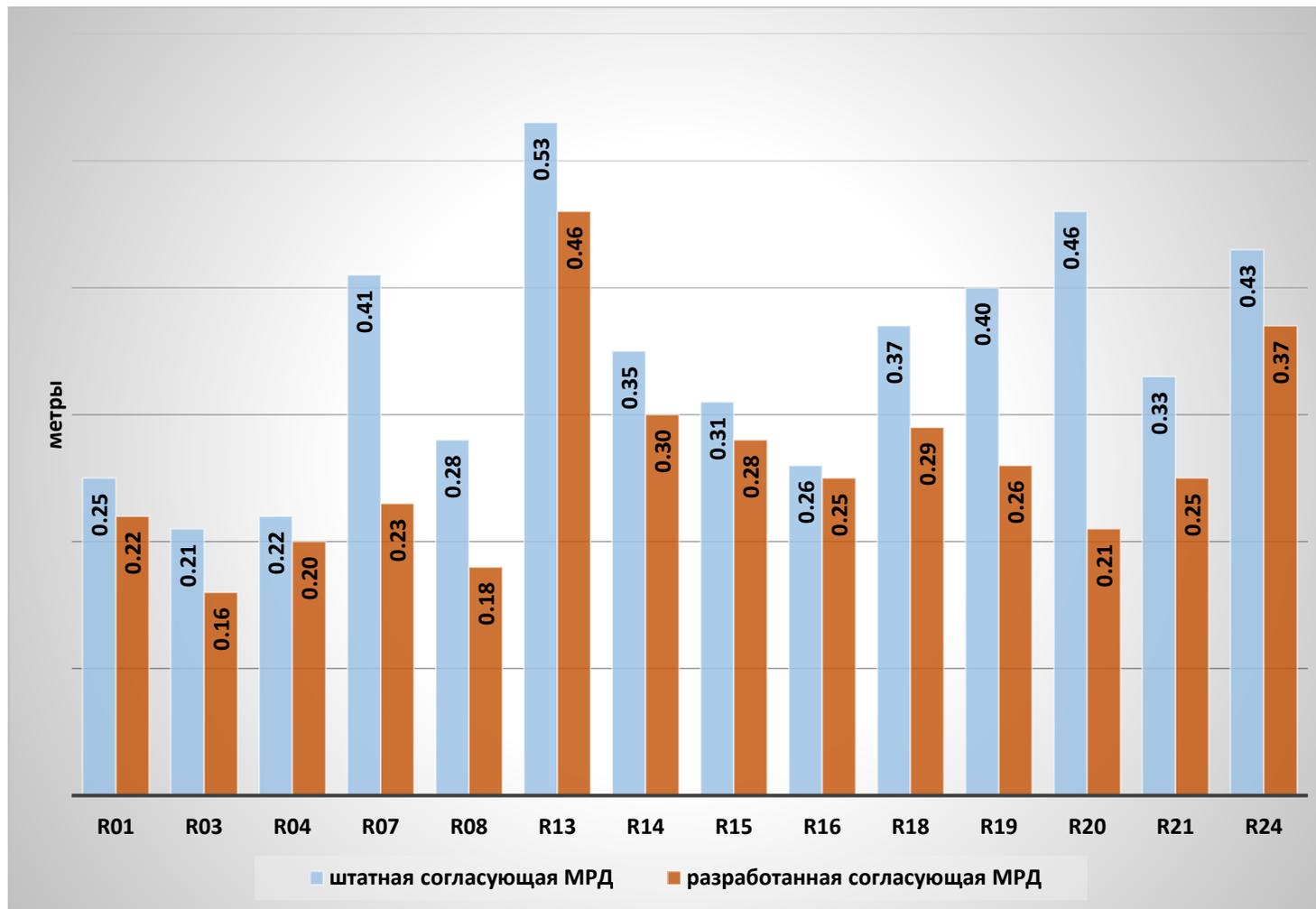


Рисунок 3.23 – ЭПД 15-ти часового прогноза ЭИ по уровню частоты 0,67, с использованием существующей согласующей МРД (1.13) и разработанной согласующей МРД на интервале 15.07.2018 – 19.07.2018 (наличие «тневых» сезонов для НКА R13, R14, R15, R16)

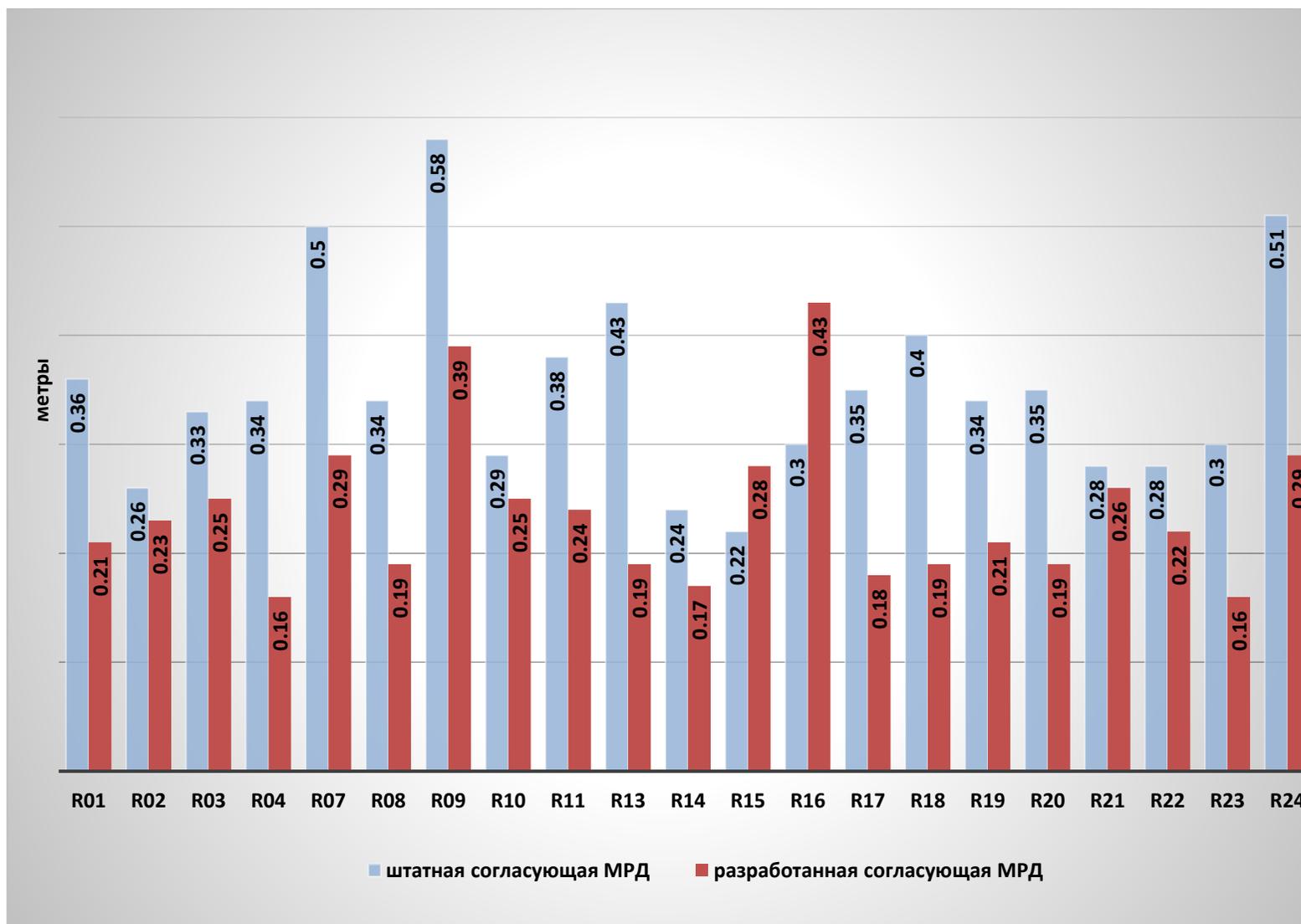


Рисунок 3.24 – ЭПД 15-ти часового прогноза ЭИ по уровню частоты 0,67, с использованием существующей согласующей МРД (1.13) и разработанной согласующей МРД на интервале 01.08.2018 – 31.08.2018

Анализируя приведенные оценки 15-ти часового прогноза эфемерид, при использовании существующей согласующей МРД (1.13) и разработанной согласующей МРД, можно сделать следующие выводы:

- при использовании разработанной согласующей МРД погрешность 15-ти часового прогноза эфемерид меньше на $\sim 25\%$;
- 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»).

3.4. Предложения по использованию согласующей модели радиационного давления в эфемеридном обеспечении системы ГЛОНАСС

Использование высокоточной согласующей МРД реализуется в несколько 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 (Δk_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 методикам, приведенным в разделе 2, 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 методикам, приведенным в разделе 2, уточняются и передаются в ЦУС для использования значения всех коэффициентов разложения. Порядок и степень разложения (количество коэффициентов) определяется с учетом таблицы 2.4 подраздела 2.1. Периодичность проведения определения коэффициентов – 1 раз в неделю на скользящем годовом 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).

Выводы по третьему разделу:

С целью отработки методик построения высокоточной согласующей МРД проведена экспериментальная оценка точности расчета и прогнозирования ЭИ НКА ГЛОНАСС. Для этого, по приведенным в разделе 2 методикам, были рассчитаны параметры разработанной согласующей МРД для полной группировки НКА ГЛОНАСС. Оценка точности прогнозирования ЭИ НКА ГЛОНАСС, с применением разработанной согласующей МРД, показала эффективность самой модели и эффективность предлагаемого подхода к формированию ее параметров. Эффект от применения разработанной согласующей МРД достигает ~25%. Разработаны предложения по использованию согласующей модели радиационного давления НКА ГЛОНАСС.

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» [39] 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 [22], 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. [22], 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 является настраиваемой 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» [38,39].

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 повышении требований к точности 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 [22];
- 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.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

| | | |
|---------|---|--|
| АО | – | акционерное общество |
| АФУ | – | антенно-фидерное устройство |
| БАМИ | – | бортовая аппаратура межспутниковых измерений |
| БИС | – | беззапросная измерительная система |
| БШВ | – | бортовая шкала времени |
| ГЛОНАСС | – | глобальная навигационная спутниковая система |
| ГПЗ | – | гравитационное поле Земли |
| ГСК | – | гринвичская система координат |
| ИД | – | исходные данные |
| ИТНП | – | измерения текущих навигационных параметров |
| КА | – | космический аппарат |
| КВНО | – | координатно-временное и навигационное обеспечение |
| КИС | – | командная измерительная станция |
| КК | – | космический комплекс |
| КОС | – | квантово-оптическая система |
| КСД | – | коэффициент светового давления |
| МД | – | модель движения |
| МЛНСС | – | межспутниковая лазерная навигационно-связная система |
| МНК | – | метод наименьших квадратов |
| МО | – | математическое ожидание |
| МРД | – | модель радиационного давления |
| МСД | – | модель светового давления |
| НИР | – | научная исследовательская работа |
| НКА | – | навигационный КА |
| НКУ | – | наземный комплекс управления |
| НМУ | – | немоделируемые ускорения |

| | | |
|--------|---|---|
| НПССК | – | номинальная панельная связанная система координат |
| НС КК | – | наземный сегмент КК ГЛОНАСС |
| ОГ | – | орбитальная группировка |
| ОКР | – | опытно конструкторская разработка |
| ОрСК | – | орбитальная система координат |
| ПВЗ | – | параметры вращения Земли |
| ПОЗ | – | прибор ориентации на Землю |
| ПОС | – | прибор ориентации на Солнце |
| ПСБ | – | панели солнечных батарей |
| РД | – | радиационное давление |
| РСДБ | – | радиоинтерферометр со сверхдлинной базой |
| СВОЭВП | – | система высокоточного определения эфемерид и временных поправок |
| СИ | – | специальная информация |
| СКО | – | среднеквадратическое отклонение |
| СОЗ | – | Солнце – объект – Земля |
| СОС | – | система ориентации и стабилизации |
| СПМО | – | специальное программное математическое обеспечение |
| СТР | – | система терморегулирования |
| ТТЗ | – | тактико-техническое задание |
| ТХ | – | точностные характеристики |
| ТЦ | – | технологический цикл |
| УНУ | – | уточненные начальные условия |
| ФЦП | – | федеральная целевая программа |
| ЦУС | – | центр управления системой |
| ЭВИ | – | эфемеридно-временная информация |
| ЭИ | – | эфемеридная информация |
| ЭО | – | эфемеридное обеспечение |

| | | |
|------|---|---|
| ЭПД | – | эквивалентная погрешность дальности |
| CODE | – | Center for Orbit Determination in Europe |
| GPS | – | Global Positioning System |
| IAC | – | Information and Analysis Center |
| IBM | – | International Business Machines |
| IGS | – | International Global Navigation Satellite Systems Service |
| JPL | – | Jet Propulsion Laboratory |

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аксенов Е.П. Теория движения искусственных спутников Земли. – М.: Наука, 1977. – 360 с.
2. Бартенев В.А., Гречкосеев А.К. Комбинированный алгоритм определения и прогнозирования параметров движения ИСЗ с использованием адаптации // Космические исследования. 1986. Т. XXIV, вып. №4. С.564–574.
3. Бартенев В.А., Гречкосеев А.К., Козорез Д.А., Красильщиков М.Н., Пасынков В.В., Себряков Г.Г., Сыпало К.И. Современные и перспективные информационные ГНСС-технологии в задачах высокоточной навигации. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2014. – 192 с. – ISBN 978-5-9221-1577-3.
4. Брагинец В.Ф., Глыбочко С.И., Жуков А.М., Забокрицкий А.В., Зотов С.М., Коробкин В.А., Кузенков М.А., Неволько М.П., Пасынков В.В., Пошеченков А.А., Смашный В.В., Титов Б.В., Хомяк Р.В. Развитие технологии эфемеридного обеспечения системы ГЛОНАСС // Космонавтика и ракетостроение. ЦНИИмаш. 2007. № 3 (48). С.63–70.
5. Брагинец В.Ф., Забокрицкий А.В., Неволько М.П., Хомяк Р.В. Достижения и перспективы развития технологии эфемеридного обеспечения системы ГЛОНАСС // Тезисы докладов Всероссийской научно-технической конференции «Навигационные спутниковые системы, их роль и значение в жизни современного человека». г. Железногорск. 2007. С.141–143.
6. 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.
7. 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. СПб.: ИПА РАН. 2017. Вып.42. С.49–56.

8. Бурдин И.А., Хомяк Р.В. Использование согласующей модели радиационного давления для повышения точности прогнозирования эфемеридной информации ГЛОНАСС // Космонавтика и ракетостроение. ЦНИИмаш. 2017. Вып.1(94). С.103–109.
9. Бурдин И.А., Хомяк Р.В. Модель радиационного давления навигационного КА «Глонасс-М» // Двойные технологии. 2018. Вып.1(82). С. 19–21.
10. Бурдин И.А., Хомяк Р.В. Определение состава коэффициентов согласующей модели радиационного давления НКА ГЛОНАСС // Космонавтика и ракетостроение. ЦНИИмаш. 2017. Вып. 6(99). С.116–120.
11. Бурдин И.А., Хомяк Р.В. Экспериментальное определение значений коэффициентов согласующей модели радиационного давления НКА ГЛОНАСС // Космонавтика и ракетостроение. ЦНИИмаш. 2018. Вып. 6(105). С. 48–55.
12. 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.
13. Васильев Л.А. Определение давления света на космические летательные аппараты. – М.: Машиностроение, 1985. – 206 с.
14. Гаязов И.С. Использование высокоточных наблюдений геодезических и навигационных ИСЗ для решения задач геодинамики. Дис. ... д-ра физ.-мат. наук. 01.03.01. – СПб., 2004. – 217 с.
15. Глобальная навигационная спутниковая система ГЛОНАСС. Система высокоточного определения эфемерид и временных поправок (СВОЭВП). Интерфейсный контрольный документ (редакция 3.0). Москва. 2011.
16. Глотов В.Д., Митрикас В.В., Ревнивых С.Г., Сердюков А.И. и др. Разработка баллистической модели и упрощенной модели светового давления КА ГЛОНАСС по результатам кампании лазерной локации. НТО ЗАО «ГЕОЦУП» 2-я редакция. 1997. – 126 с.

17. Гречкосеев А.К., Марарескул Т.А. Построение модели сил радиационного давления излучения Солнца, влияющего на движение центра масс космического аппарата // Изв. вузов. Приборостроение. 2004. Т.47, № 4. С. 10–14.

18. Дворкин В.В., Карутин С.Н. Оптимизация состава глобальной сети измерительных станций для высокоточного навигационно-временного обеспечения потребителей ГЛОНАСС // Гироскопия и навигация. 2013. № 2 (81). С.3–13.

19. ИБПА.466535.055П32.1. Система прецизионной навигации МО РФ (Шифр ОКР – «Сантиметр»). Технический проект. Пояснительная записка. Часть 3. Центр определения прецизионной информации по данным Российских средств. Книга 1. Состав, принципы построения и функционирования. ПЗ-02. – М.: ОАО «НПК «СПП». 2014. – 429 с.

20. ИБПА.466535.055П33.3. Система прецизионной навигации МО РФ (Шифр ОКР – «Сантиметр»). Технический проект. Пояснительная записка. Часть 4. Центр определения прецизионной информации по данным международных средств (ЦПИ-М). Книга 3. Технологии расчета данных. ПЗ-03. – М.: ОАО «НПК «СПП». 2014. – 260 с.

21. ИБПА.466535.055П39. 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.

22. Карутин С.Н. Текущее состояние и модернизация системы ГЛОНАСС // 9-е заседание Международного комитета по ГНСС Европейское агентство по ГНСС. Прага. 2014. URL: <https://www.glonass-iac.ru/aboutIAC/presentations/2014ICG-9.pdf> (дата обращения 11.02.2019).

23. Карутин С.Н., Власов И.Б., Дворкин В.В. Дифференциальная коррекция и мониторинг глобальных навигационных спутниковых систем. – М: Изд-во Московского университета; ГАЛЕРИЯ, 2014. – 464 с.

24. Кибзун А.И., Горяинова Е.Р., Наумов А.В., Сиротин А.Н. Теория вероятностей и математическая статистика. Базовый курс с примерами и задачами. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002. – 224 с. – ISBN 5-9221-0231-1.

25. Комаров М.М., Сазонов В.В., Климович Д.Н. Расчет сил и моментов светового давления, действующих на роторный солнечный парус // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша РАН. 1995. № 59. 18 с.

26. Коробкин В.А., Хомяк Р.В. Методика коррекции согласуемых параметров модели радиационного давления КА ГЛОНАСС // Научные чтения памяти М.К. Тихонравова по военной космонавтике. Тезисы докладов. 2000.

27. Коробкин В.А., Хомяк Р.В. Результаты согласования модели радиационного давления КА ГЛОНАСС по высокоточным измерениям международной сети лазерных станций // Научные чтения памяти М.К. Тихонравова по военной космонавтике. Тезисы докладов. 2000.

28. Круглов А.В., Урличич Ю.М., Немцев В.И. Система эфемеридно-временного обеспечения космического аппарата глобальной навигационной спутниковой системы. Патент 130411 РФ. 2013.

29. Куропятников А.Д. Методика уточнения параметров модели радиационного давления для повышения точности прогнозирования движения навигационных космических аппаратов ГЛОНАСС. Дис. ... канд. техн. наук. 05.07.09. – г. Юбилейный, Моск. обл., 2001. – 131 с.

30. Лоусон Ч., Хенсон Р. Численное решение задач метода наименьших квадратов. – М.: Наука, 1986. – 232 с.

31. Марков Ю.Г., Михайлов М.В., Почукаев В.Н. Высокоточный прогноз орбит космического аппарата как результат рационального выбора возмущающих факторов // Доклады Академии наук. 2014. Т.457, № 2. С.170–174. – DOI: 10.7868/S0869565214200110.

32. Отчет «Материалы в методики учета и оценки влияния сил радиационного давления на движение КА «ГЛОНАСС-К»». инв. № 1569 и/м. – М.: ЗАО «ЭКА». 2009.

33. Отчет «Отработка и совершенствование модели радиационного давления НКА «ГЛОНАСС-К»». инв. № 2210 и/м. – г. Юбилейный, Моск. обл.: ОАО «ЭКА». 2010.

34. Панюшин А.Н., Куропятников А.Д. Повышение точности моделирования радиационного давления при расчете эфемерид НКА ГЛОНАСС // Геодезия и картография. 2001. № 8. С.8–13.

35. Панюшин А.Н., Куропятников А.Д. Точность прогнозирования эфемерид ГЛОНАСС при оперативном уточнении параметров модели радиационного давления // Геодезия и картография. 2001. № 9. С.14–17.

36. Параметры Земли 1990 года (ПЗ-90.11). – М., 2014.

37. Пасынков В.В., Брагинец В.Ф., Жуков А.Н., Зотов С.М., Коробкин В.А., Титов Е.В., Суевалов В.В., Хомяк Р.В. Решение проблемы точности системы ГЛОНАСС и перспективы ее улучшения в ближайшие годы // Труды ИПА РАН. СПб.: ИПА РАН. Вып. 35. 2015. С.17–23.

38. Федеральная целевая программа «Глобальная навигационная система» на период 2002-2011 гг. (утв. пост. Правительства РФ от 20.08.2001 № 587, с изм. пост. Правительства РФ от 12.09.2008 № 680). – 2008.

39. Федеральная целевая программа «Поддержание, развитие и использование системы ГЛОНАСС на 2012-2020 годы» (утверждена постановлением Правительства Российской Федерации от 03.03.2012 № 189). – 2012.

40. Хомяк Р.В. Особенности влияния уходящего излучения Земли на объект сложной формы // Научно-техническая конференция молодых ученых и специалистов, посвященная 50-летию РКК «Энергия». Сборник докладов. Королев. 1996.

41. Чувашов И.Н., Пахомова Е.В., Александрова А.Г. Модели сил светового давления для спутников системы ГЛОНАСС // Известия высших учебных заведений. Физика. 2014. Т. 57, №10/2. С.103–108.

42. Яворский Б.М., Детлаф А.А., Лебедев А.К. Справочник по физике для инженеров и студентов вузов. – М.: ООО «Издательство Оникс»: ООО «Издательство «Мир и Образование», 2006. – 1056 с.

43. Bar-Sever Y.E., Kuang, D. New Empirically Derived Solar Radiation Pressure Model for Global Positioning System Satellites. The Interplanetary Network

Progress Report 42-159, Nov. 2004, P. 1–11. URL: https://www.researchgate.net/publication/237454091_New_Empirically_Derived_Solar_Radiation_Pressure_Model_for_Global_Positioning_System_Satellites (дата обращения 11.02.2019).

44. Fliegel H.F., Gallini T.E. Solar force modeling of block IIR global positioning system satellites // *Journal of Spacecraft and Rockets*. 1996. V. 33, No. 6. P.863–866 – DOI: 10.2514/3.26851.

45. Fliegel H.F., Gallini T.E., Swift E.R. Global Positioning System Radiation Force Model for geodetic applications // *Journal of Geophysical Research. Solid Earth*. 1992. V. 97, Iss. B1. P.559–568. – DOI: 10.1029/91JB02564.

46. Hesar S.G., Scheeres D.J., McMahon J.W., Rozitis B. Precise Model for Small-Body Thermal Radiation Pressure Acting on Spacecraft // *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*. 2017. V.40, No.10. P. 2432–2441.

47. IERS Standards (1992). (IERS Technical Note; 13) / D.D. McCarthy (ed.) – P.: Central Bureau of IERS - Observatoire de Paris, 1992. – xii p. + 151 p. URL: https://www.iers.org/SharedDocs/Publikationen/EN/IERS/Publications/tn/TechnNote13/tn13.pdf?__blob=publicationFile&v=1 (дата обращения 11.02.2019).

48. Kubo-oka T., Sengoku A. Solar radiation pressure model for the relay satellite of SELENE // *Earth, Planets and Space*. 1999. V. 51, № 9. P.979–986. – DOI: 10.1186/BF03351568. URL: <https://earth-planets-space.springeropen.com/track/pdf/10.1186/BF03351568> (дата обращения 11.02.2019).

49. Liang Heng, Grace Xingxin Gao, Todd Walter, Per Enge Statistical Characterization of GLONASS Broadcast Ephemeris Errors // *Proceedings of the 24th international technical meeting of the satellite division of the institute of navigation (ION GNSS 2011)*, Portland, OR. 2011. P.3109–3117.

50. Marquis W., Krier C. Examination of the GPS Block IIR Solar Pressure Model // *Proceedings of ION-GPS-2000*, Salt Lake City, UT, September 2000. P.407–415.

51. McMahon J.W., Scheeres D.J. New Solar Radiation Pressure Force Model for Navigation // *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*. 2010. Vol. 33, No. 5. P.1418-1428. – DOI:10.2514/1.48434.

52. Montenbruck O., Schmid R., Mercier F., Steigenberger P., Noll C., Fatkulin R., Kogure S., Ganeshan A.S. GNSS satellite geometry and attitude models // *Advances in Space Research*. 2015. V. 56, iss. 6. P.1015–1029. – DOI: 10.1016/j.asr.2015.06.019. URL:https://ac.els-cdn.com/S0273117715004378/1-s2.0-S0273117715004378main.pdf?_tid=48a0f2f6-074c-443f-a33e44317e63ba70&acdnat=1549881734_d769fadab138872ca9d89f3b9a9ecd23 (дата обращения 11.02.2019).

53. Rodriguez-Solano C.J., Hugentobler U., Steigenberger P., Lutz S. Impact of Earth radiation pressure on GPS position estimates // *Journal of Geodesy*. 2012. V. 86, iss. 5. P.309–317. – DOI: 10.1007/s00190-011-0517-4. URL: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2Fs00190-011-0517-4.pdf> (дата обращения 11.02.2019).

54. Springer T.A., Beutler G., Rothacher M. A New Solar Radiation Pressure Model for GPS Satellites // *GPS Solutions*. 1999. V. 2, iss. 3. P.50–62. – DOI: 10.1007/PL00012757. URL: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2FPL00012757.pdf> (дата обращения 11.02.2019).

55. The International GNSS Service URL: www.igs.org.

56. Willson R.C., Hudson H.S. The Sun's luminosity over a complete solar cycle // *Nature*. 1991. v. 351. P.42–44.

57. Ziebart M. High Precision Analytical Solar Radiation Pressure Modelling for GNSS Spacecraft. PhD thesis, University of East London. 2001. – xvi p. + 272 p. URL: https://www.researchgate.net/publication/264872340_High_Precision_Analytical_Solar_Radiation_Pressure_Modelling_for_GNSS_Spacecraft (дата обращения 11.02.2019).

58. Ziebart M., Adhya S., Sibthorpe A., Edwards S., Cross P. Combined radiation pressure and thermal modelling of complex satellites: Algorithms and on-orbit tests // *Advances in Space Research*. V. 36, iss. 3. 2005. P.424–430. – DOI

10.1016/j.asr.2005.01.014. URL: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2FPL00012757.pdf> (дата обращения 11.02.2019).

ПРИЛОЖЕНИЕ А

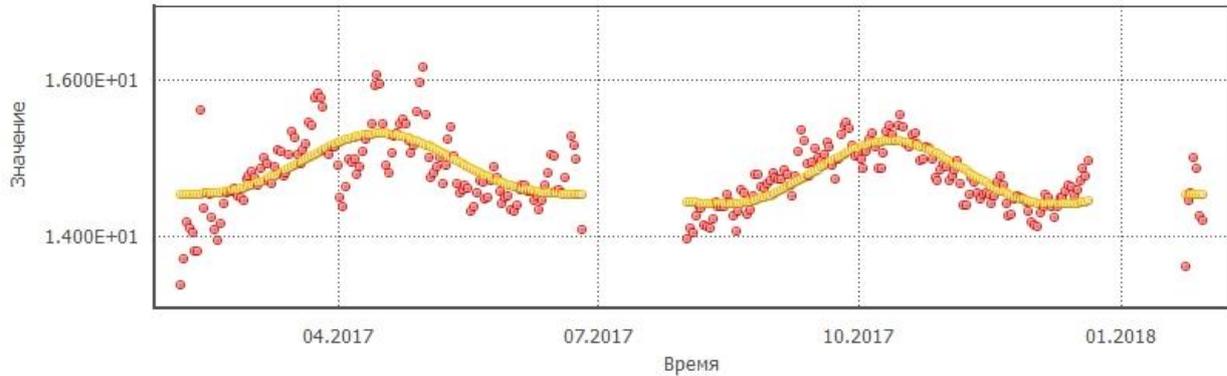
Графики с результатами определения значений коэффициентов
высокоточной согласующей МРД по НКА ГЛОНАСС

Рисунок А.1 – 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 №717 для «бестеневых» сезонов

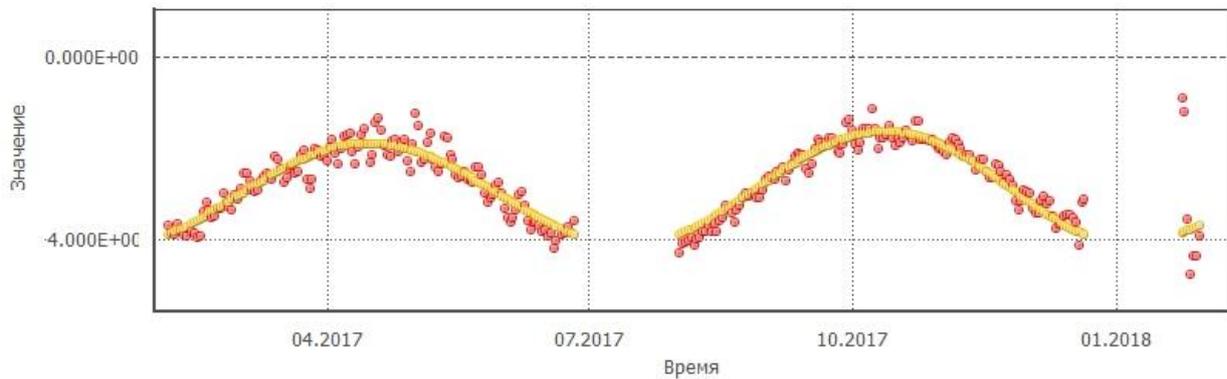


Рисунок А.2 – Реализации определения промежуточного коэффициента $C_1^{(1)}(\gamma)$ и построенная по ним модель с использованием уточненных коэффициентов $A_{11}^{(1)}, A_{21}^{(1)}, A_{31}^{(1)}, A_{41}^{(1)}$ НКА №717 для «бестеневых» сезонов

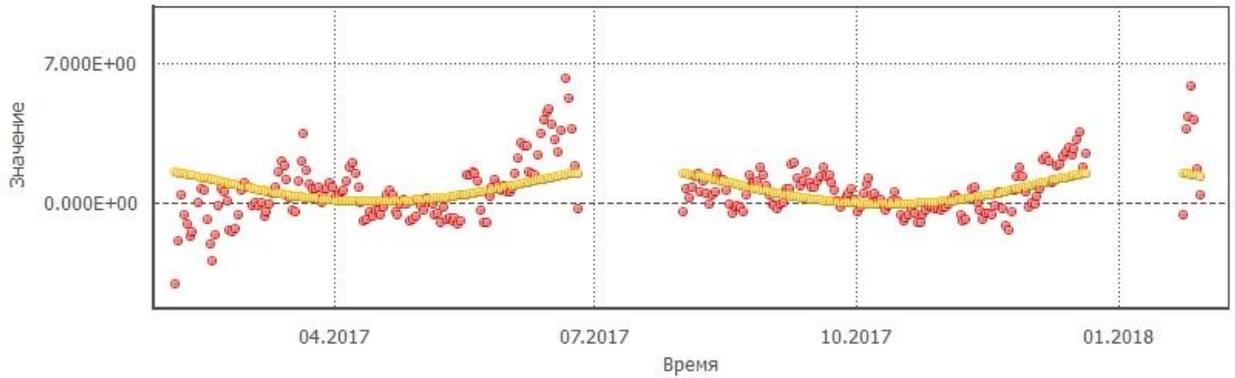


Рисунок А.3 – Реализации определения промежуточного коэффициента $C_2^{(1)}(\gamma)$ и построенная по ним модель с использованием уточненных коэффициентов $A_{22}^{(1)}, A_{32}^{(1)}, A_{42}^{(1)}$ НКА №717 для «бестеневых» сезонов

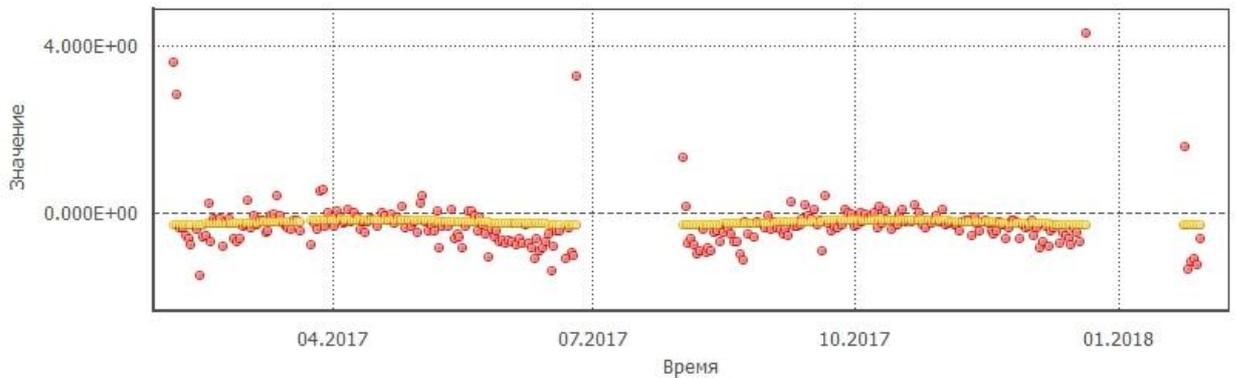


Рисунок А.4 – Реализации определения промежуточного коэффициента $C_3^{(1)}(\gamma)$ и построенная по ним модель с использованием уточненных коэффициентов $A_{33}^{(1)}, A_{43}^{(1)}$ НКА №717 для «бестеневых» сезонов

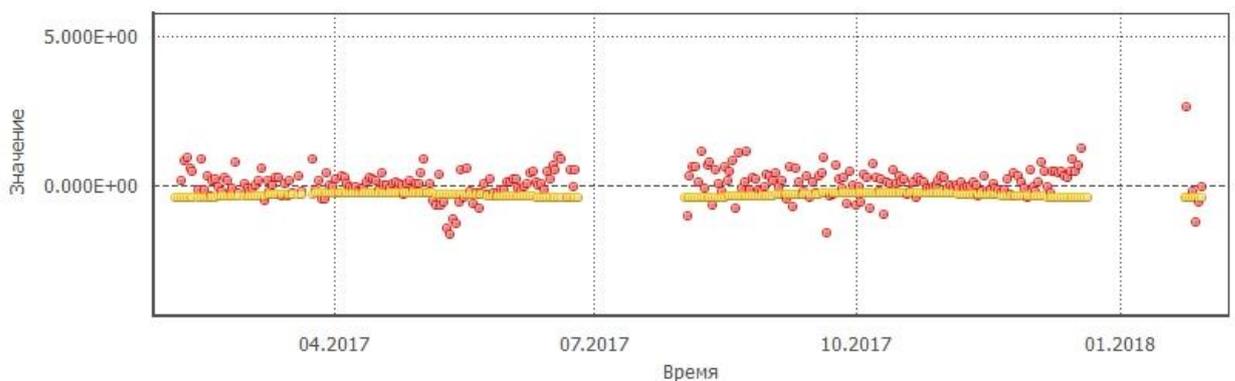


Рисунок А.5 – Реализации определения промежуточного коэффициента $C_4^{(1)}(\gamma)$ и построенная по ним модель с использованием уточненных коэффициентов $A_{44}^{(1)}$ НКА №717 для «бестеневых» сезонов

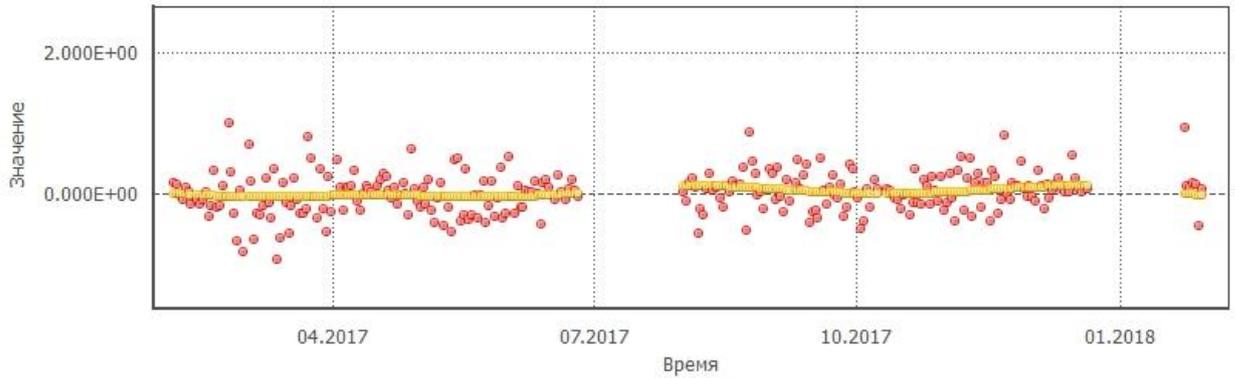


Рисунок А.6 – Реализации определения промежуточного коэффициента $D_1^{(1)}(\gamma)$ и построенная по ним модель с использованием уточненных коэффициентов $B_{11}^{(1)}, B_{21}^{(1)}, B_{31}^{(1)}, B_{41}^{(1)}$ НКА №717 для «бестеневых» сезонов

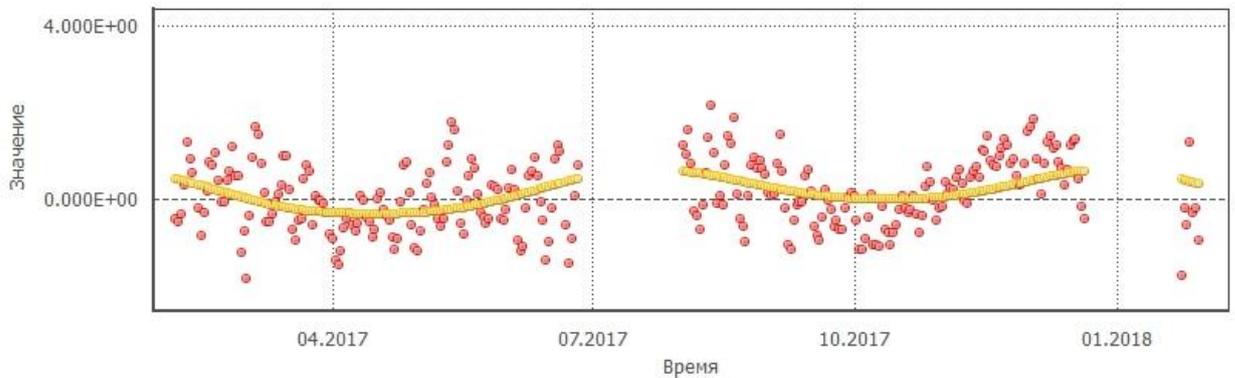


Рисунок А.7 – Реализации определения промежуточного коэффициента $D_2^{(1)}(\gamma)$ и построенная по ним модель с использованием уточненных коэффициентов $B_{22}^{(1)}, B_{32}^{(1)}, B_{42}^{(1)}$ НКА №717 для «бестеневых» сезонов

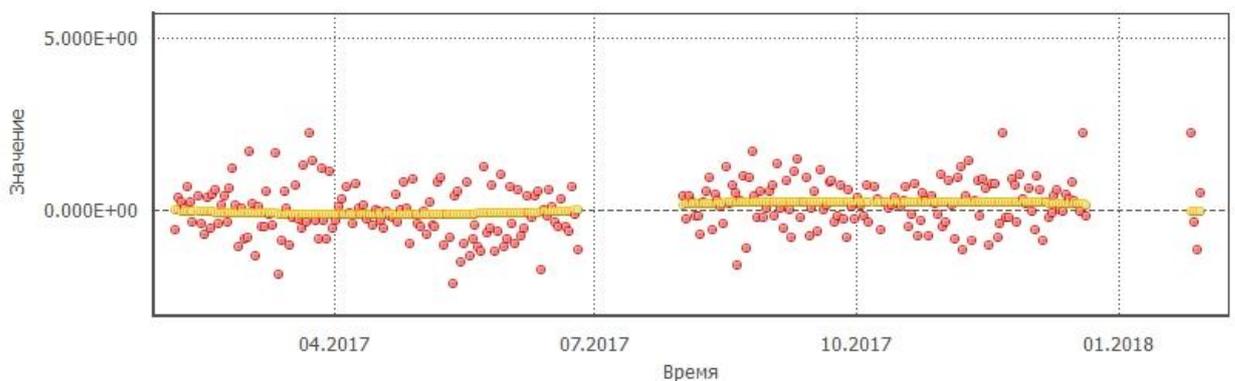


Рисунок А.8 – Реализации определения промежуточного коэффициента $D_3^{(1)}(\gamma)$ и построенная по ним модель с использованием уточненных коэффициентов $B_{33}^{(1)}, B_{43}^{(1)}$ НКА №717 для «бестеневых» сезонов

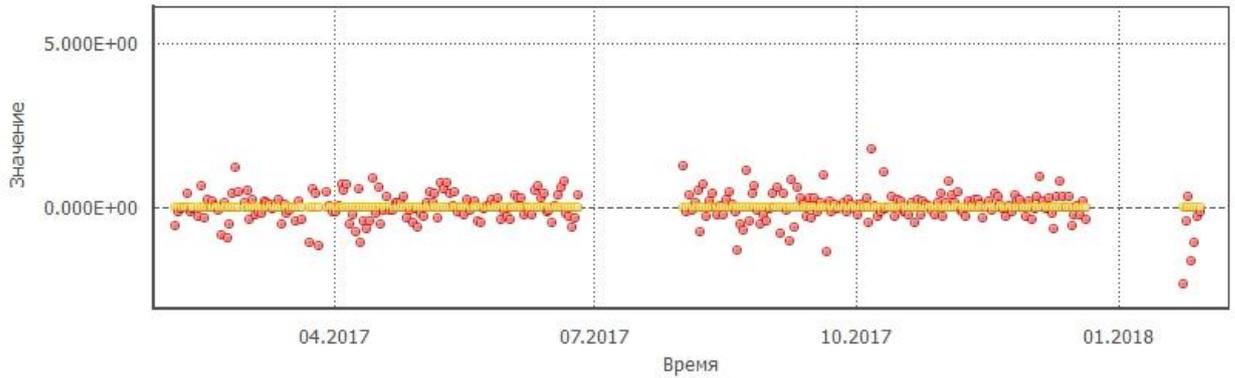


Рисунок А.9 – Реализации определения промежуточного коэффициента $D_4^{(1)}(\gamma)$ и построенная по ним модель с использованием уточненных коэффициентов $B_{44}^{(1)}$ НККА №717 для «бестеневых» сезонов

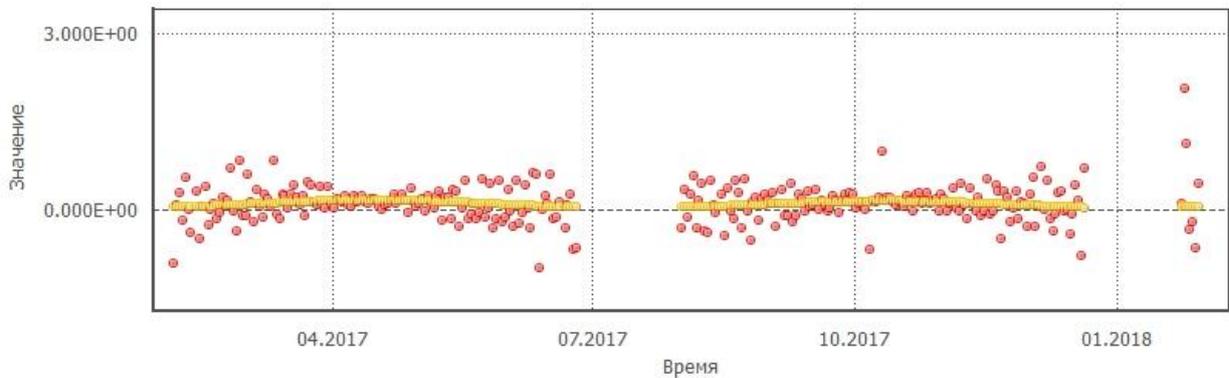


Рисунок А.10 – Реализации определения промежуточного коэффициента $C_0^{(2)}(\gamma)$ и построенная по ним модель с использованием уточненных коэффициентов $A_{00}^{(2)}, A_{10}^{(2)}, A_{20}^{(2)}, A_{30}^{(2)}, A_{40}^{(2)}$ НККА №717 для «бестеневых» сезонов

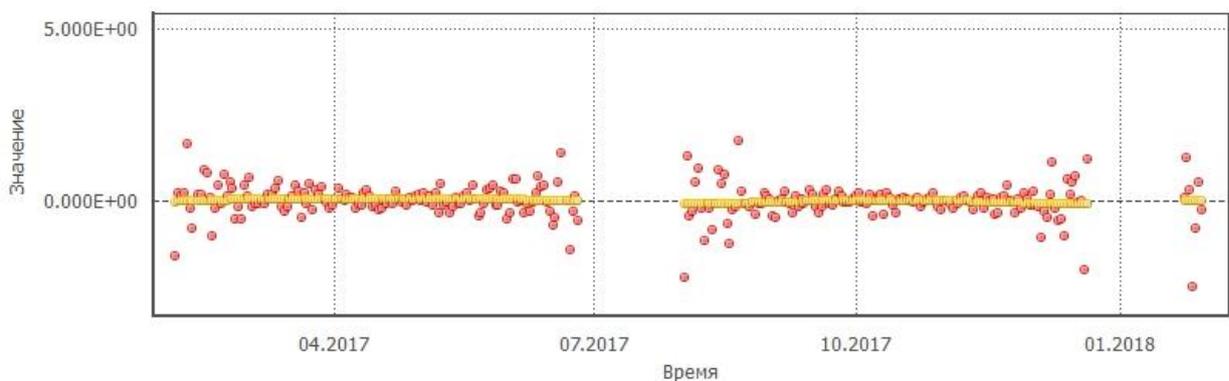


Рисунок А.11 – Реализации определения промежуточного коэффициента $C_1^{(2)}(\gamma)$ и построенная по ним модель с использованием уточненных коэффициентов $A_{11}^{(2)}, A_{21}^{(2)}, A_{31}^{(2)}, A_{41}^{(2)}$ НККА №717 для «бестеневых» сезонов

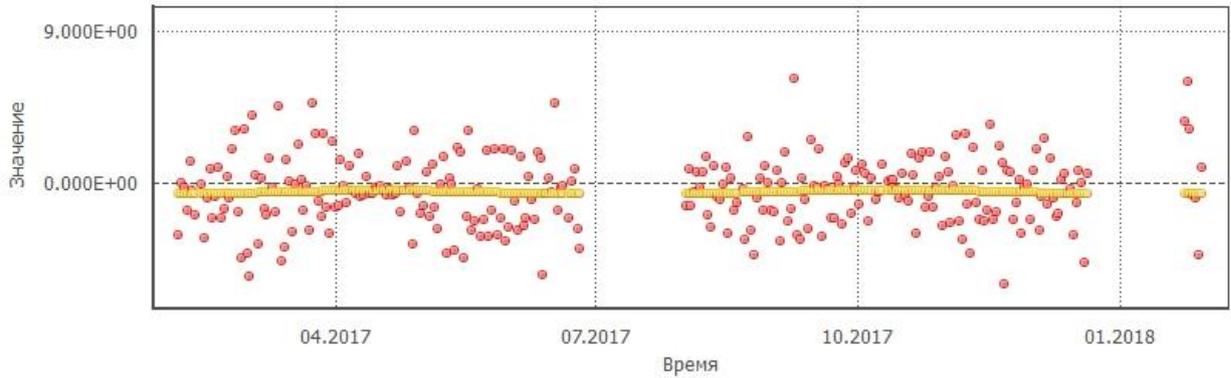


Рисунок А.12 – Реализации определения промежуточного коэффициента $C_2^{(2)}(\gamma)$ и построенная по ним модель с использованием уточненных коэффициентов $A_{22}^{(2)}, A_{32}^{(2)}, A_{42}^{(2)}$ НКА №717 для «бестеневых» сезонов

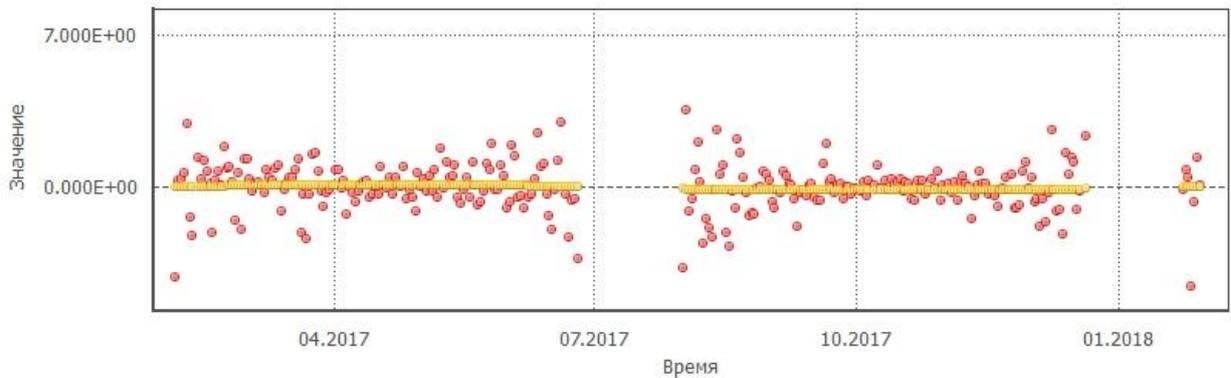


Рисунок А.13 – Реализации определения промежуточного коэффициента $C_3^{(2)}(\gamma)$ и построенная по ним модель с использованием уточненных коэффициентов $A_{33}^{(2)}, A_{43}^{(2)}$ НКА №717 для «бестеневых» сезонов

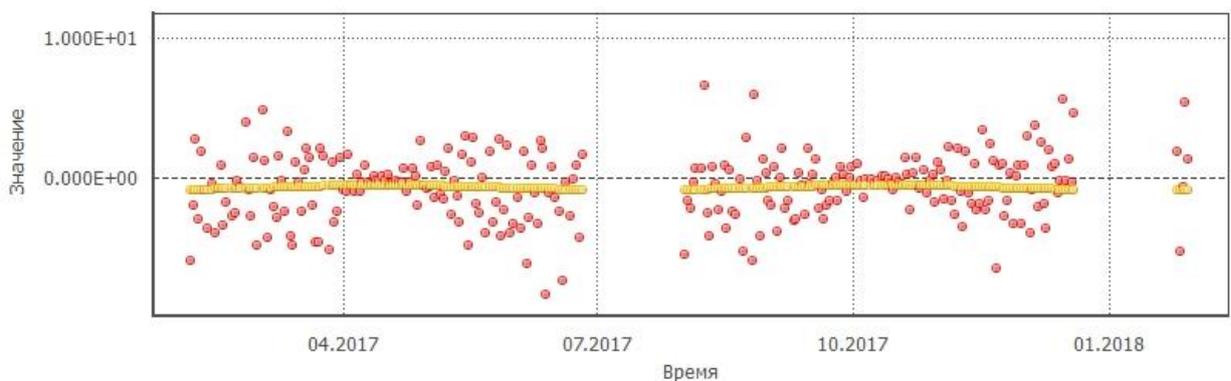


Рисунок А.14 – Реализации определения промежуточного коэффициента $C_4^{(2)}(\gamma)$ и построенная по ним модель с использованием уточненных коэффициентов $A_{44}^{(2)}$ НКА №717 для «бестеневых» сезонов

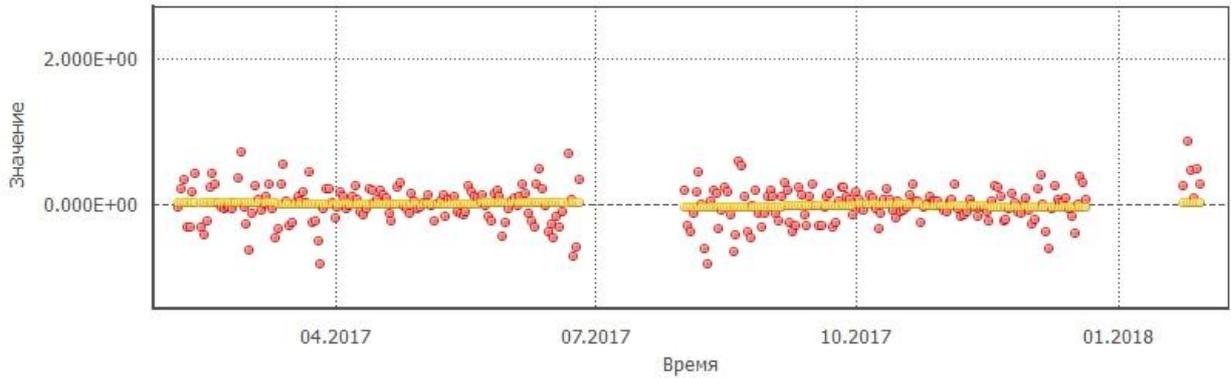


Рисунок А.15 – Реализации определения промежуточного коэффициента $D_1^{(2)}(\gamma)$ и построенная по ним модель с использованием уточненных коэффициентов $B_{11}^{(2)}, B_{21}^{(2)}, B_{31}^{(2)}, B_{41}^{(2)}$ НКА №717 для «бестеневых» сезонов

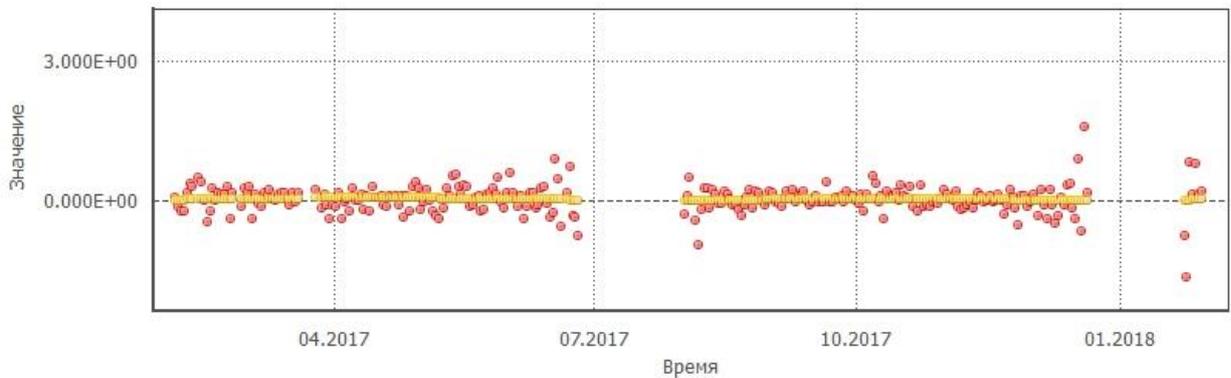


Рисунок А.16 – Реализации определения промежуточного коэффициента $D_2^{(2)}(\gamma)$ и построенная по ним модель с использованием уточненных коэффициентов $B_{22}^{(2)}, B_{32}^{(2)}, B_{42}^{(2)}$ НКА №717 для «бестеневых» сезонов

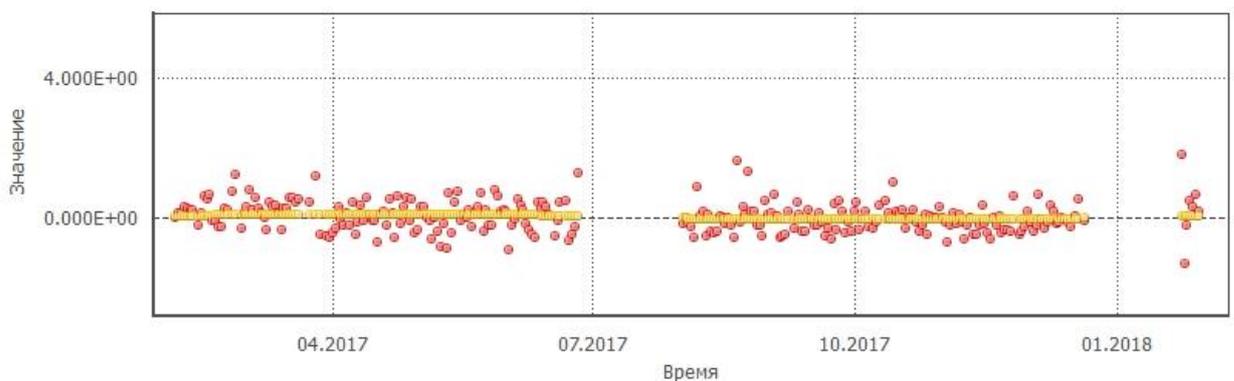


Рисунок А.17 – Реализации определения промежуточного коэффициента $D_3^{(2)}(\gamma)$ и построенная по ним модель с использованием уточненных коэффициентов $B_{33}^{(2)}, B_{43}^{(2)}$ НКА №717 для «бестеневых» сезонов

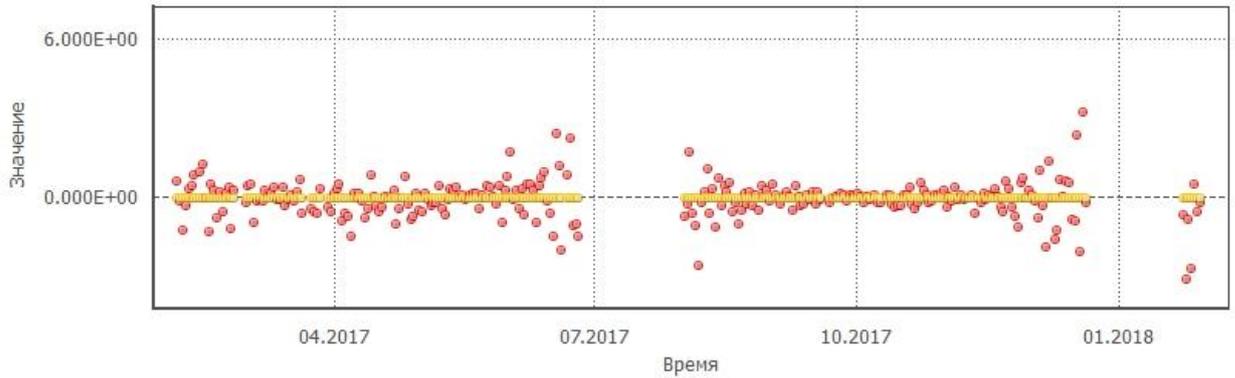


Рисунок А.18 – Реализации определения промежуточного коэффициента $D_4^{(2)}(\gamma)$ и построенная по ним модель с использованием уточненных коэффициентов $B_{44}^{(2)}$ НКА №717 для «бестеневых» сезонов

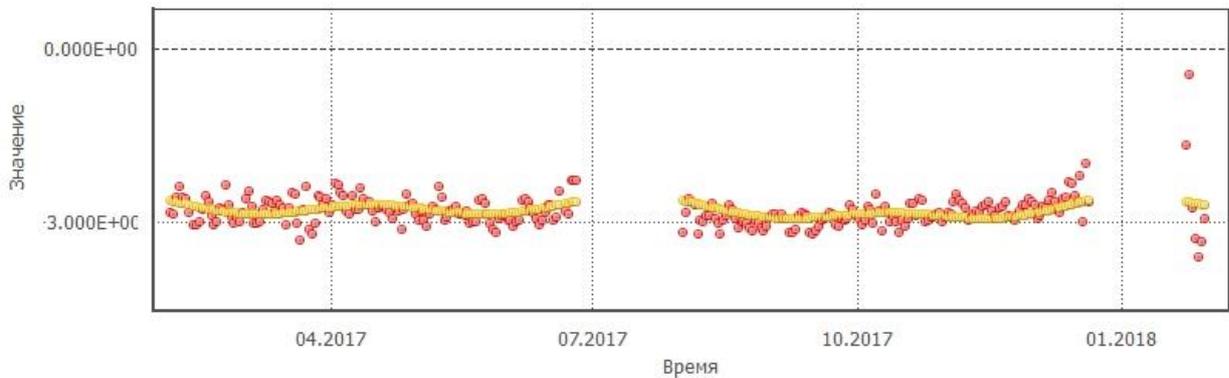


Рисунок А.19 – Реализации определения промежуточного коэффициента $C_0^{(3)}(\gamma)$ и построенная по ним модель с использованием уточненных коэффициентов $A_{00}^{(3)}, A_{10}^{(3)}, A_{20}^{(3)}, A_{30}^{(3)}, A_{40}^{(3)}$ НКА №717 для «бестеневых» сезонов

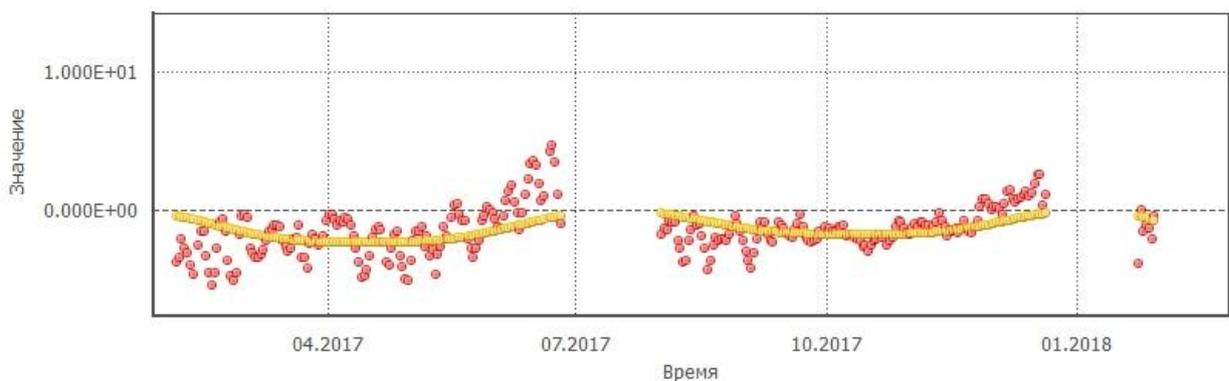


Рисунок А.20 – Реализации определения промежуточного коэффициента $C_1^{(3)}(\gamma)$ и построенная по ним модель с использованием уточненных коэффициентов $A_{11}^{(3)}, A_{21}^{(3)}, A_{31}^{(3)}, A_{41}^{(3)}$ НКА №717 для «бестеневых» сезонов

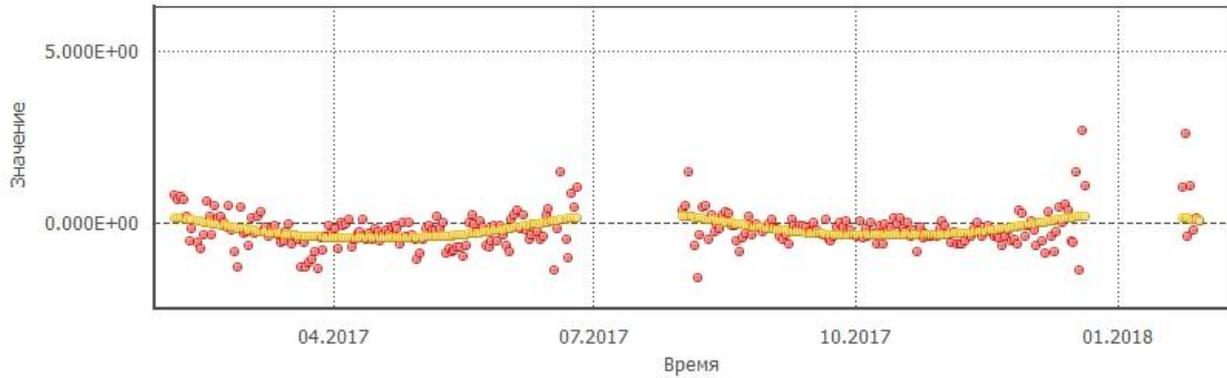


Рисунок А.21 – Реализации определения промежуточного коэффициента $C_2^{(3)}(\gamma)$ и построенная по ним модель с использованием уточненных коэффициентов $A_{22}^{(3)}, A_{32}^{(3)}, A_{42}^{(3)}$ НКА №717 для «бестеневых» сезонов

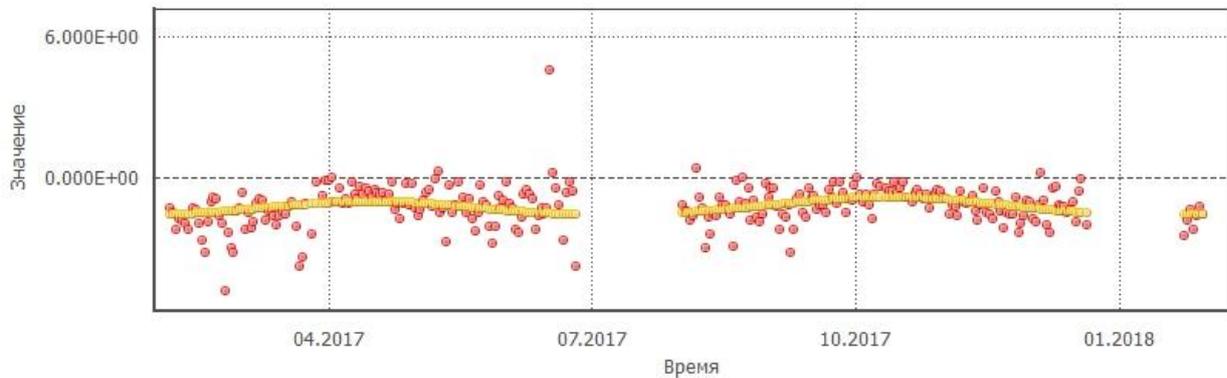


Рисунок А.22 – Реализации определения промежуточного коэффициента $C_3^{(3)}(\gamma)$ и построенная по ним модель с использованием уточненных коэффициентов $A_{33}^{(3)}, A_{43}^{(3)}$ НКА №717 для «бестеневых» сезонов

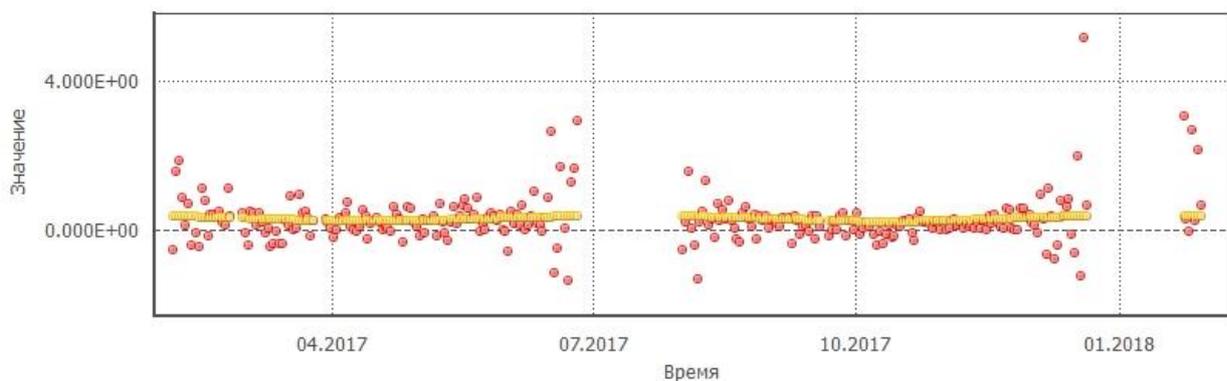


Рисунок А.23 – Реализации определения промежуточного коэффициента $C_4^{(3)}(\gamma)$ и построенная по ним модель с использованием уточненных коэффициентов $A_{44}^{(3)}$ НКА №717 для «бестеневых» сезонов

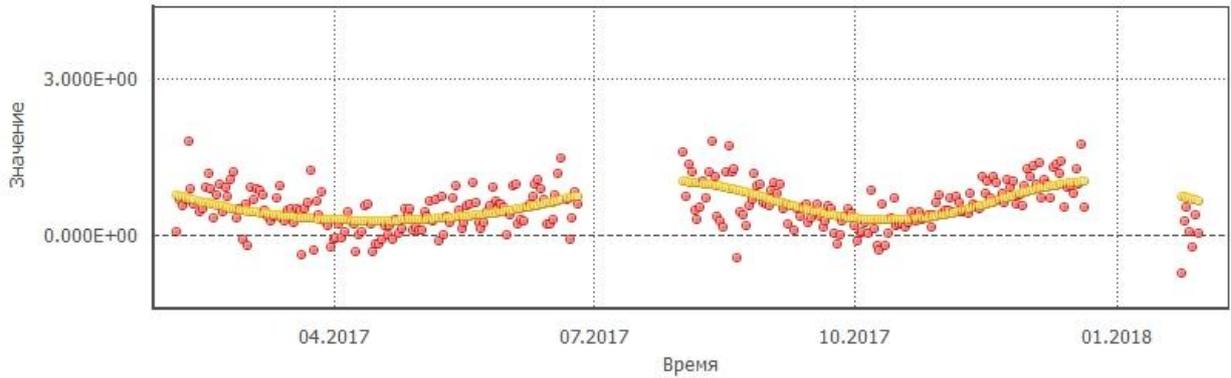


Рисунок А.24 – Реализации определения промежуточного коэффициента $D_1^{(3)}(\gamma)$ и построенная по ним модель с использованием уточненных коэффициентов $B_{11}^{(3)}, B_{21}^{(3)}, B_{31}^{(3)}, B_{41}^{(3)}$ НКА №717 для «бестеневых» сезонов

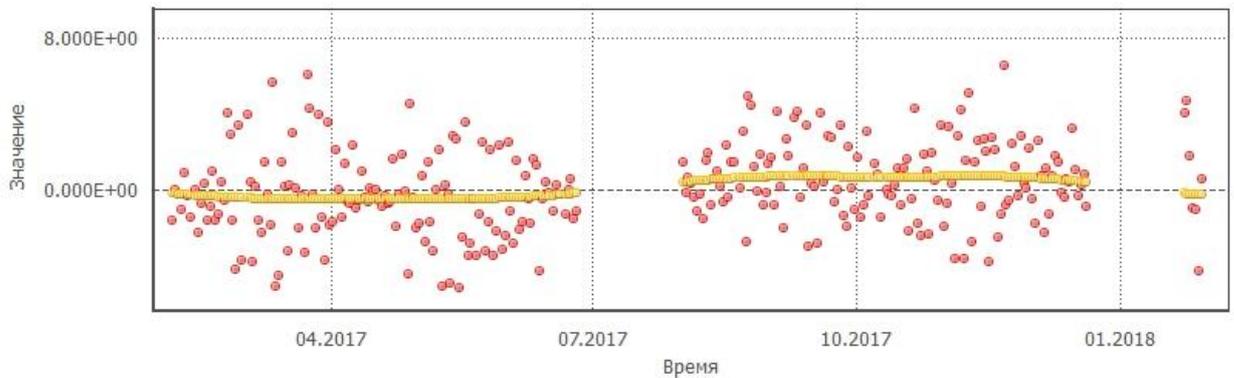


Рисунок А.25 – Реализации определения промежуточного коэффициента $D_2^{(3)}(\gamma)$ и построенная по ним модель с использованием уточненных коэффициентов $B_{22}^{(3)}, B_{32}^{(3)}, B_{42}^{(3)}$ НКА №717 для «бестеневых» сезонов

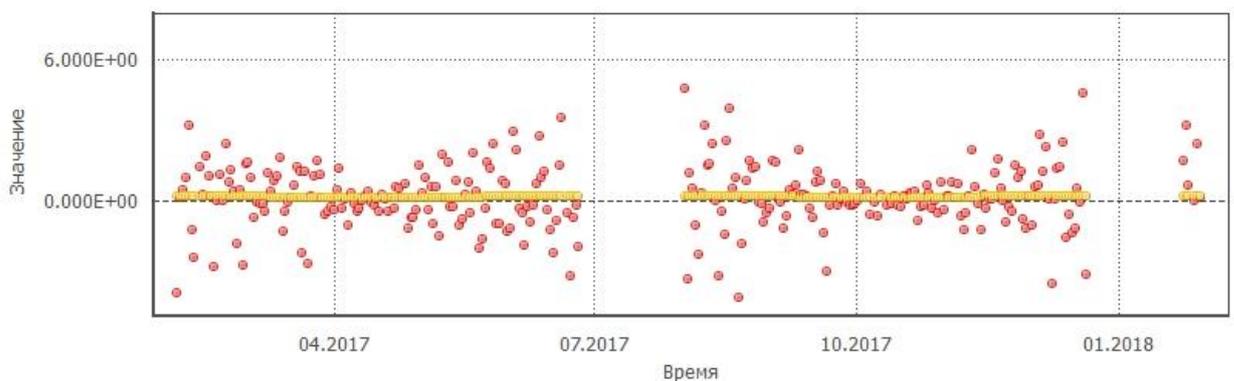


Рисунок А.26 – Реализации определения промежуточного коэффициента $D_3^{(3)}(\gamma)$ и построенная по ним модель с использованием уточненных коэффициентов $B_{33}^{(3)}, B_{43}^{(3)}$ НКА №717 для «бестеневых» сезонов

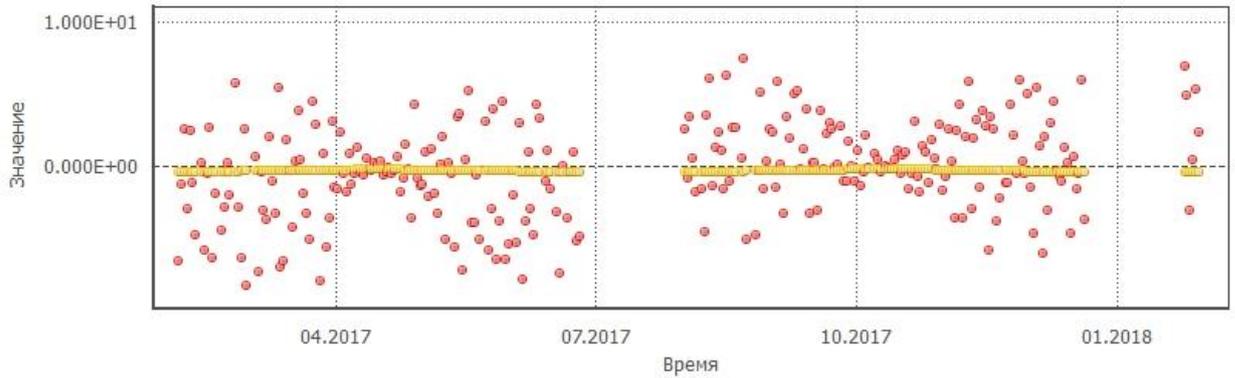


Рисунок А.27 – Реализации определения промежуточного коэффициента $D_4^{(3)}(\gamma)$ и построенная по ним модель с использованием уточненных коэффициентов $B_{44}^{(3)}$ НКА №717 для «бестеневых» сезонов

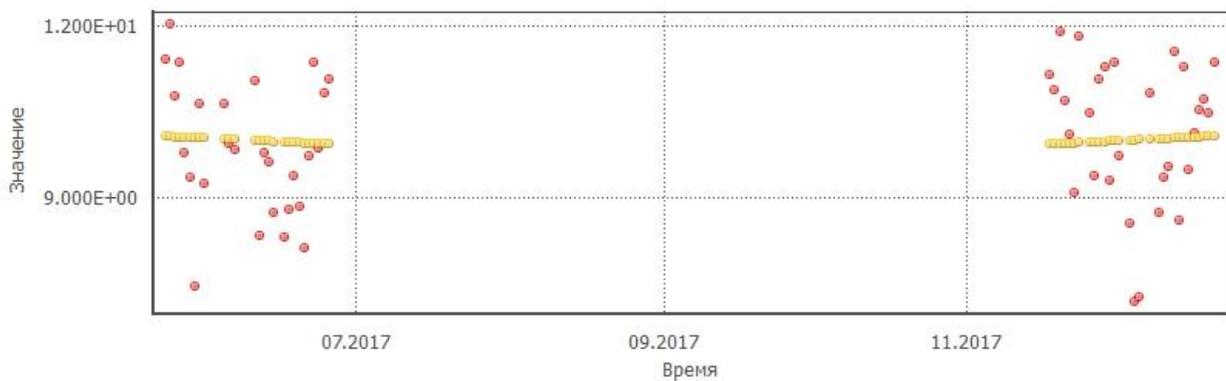


Рисунок А.28 – Реализации определения промежуточного коэффициента $C_0^{(1)}(\gamma)$ и построенная по ним модель с использованием уточненных коэффициентов $A_{00}^{(1)}, A_{10}^{(1)}, A_{20}^{(1)}, A_{30}^{(1)}, A_{40}^{(1)}$ НКА №720 для «теневых» сезонов

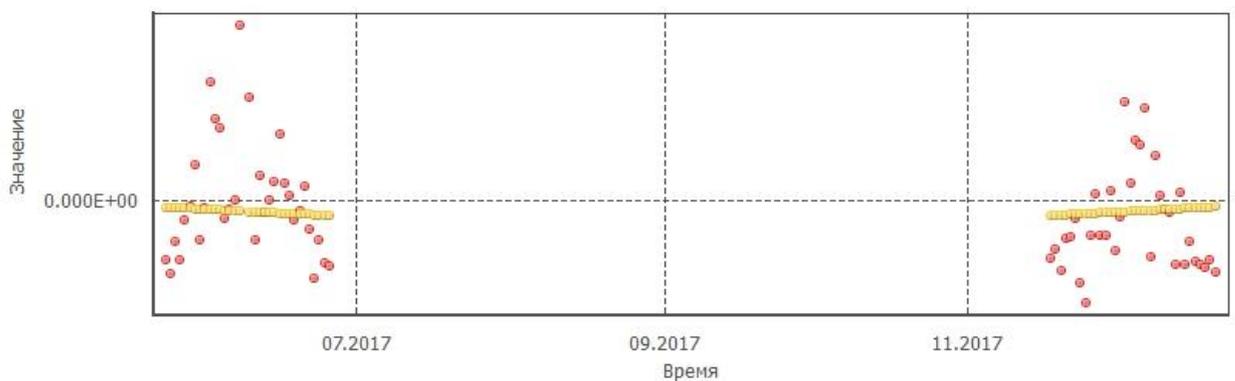


Рисунок А.29 – Реализации определения промежуточного коэффициента $C_1^{(1)}(\gamma)$ и построенная по ним модель с использованием уточненных коэффициентов $A_{11}^{(1)}, A_{21}^{(1)}, A_{31}^{(1)}, A_{41}^{(1)}$ НКА №720 для «теневых» сезонов



Рисунок А.30 – Реализации определения промежуточного коэффициента $C_2^{(1)}(\gamma)$ и построенная по ним модель с использованием уточненных коэффициентов $A_{22}^{(1)}, A_{32}^{(1)}, A_{42}^{(1)}$ НКА №720 для «теневого» сезонов

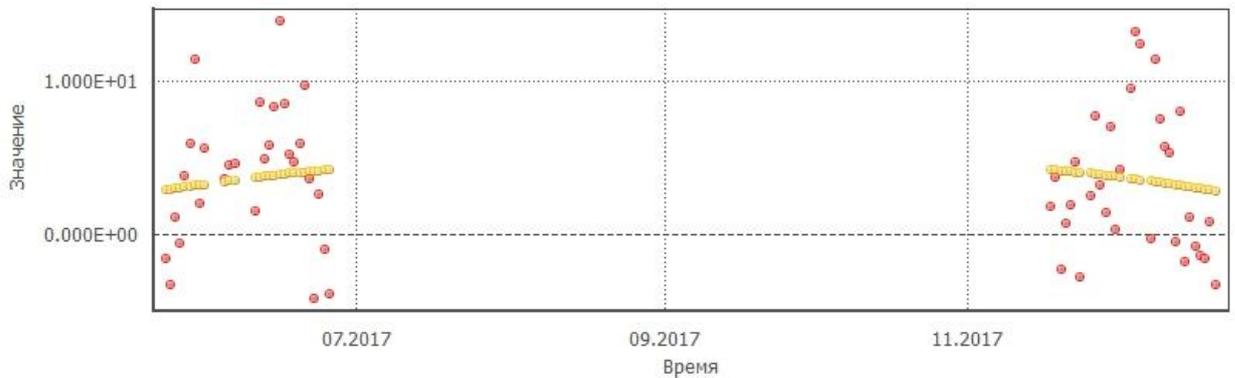


Рисунок А.31 – Реализации определения промежуточного коэффициента $C_3^{(1)}(\gamma)$ и построенная по ним модель с использованием уточненных коэффициентов $A_{33}^{(1)}, A_{43}^{(1)}$ НКА №720 для «теневого» сезонов

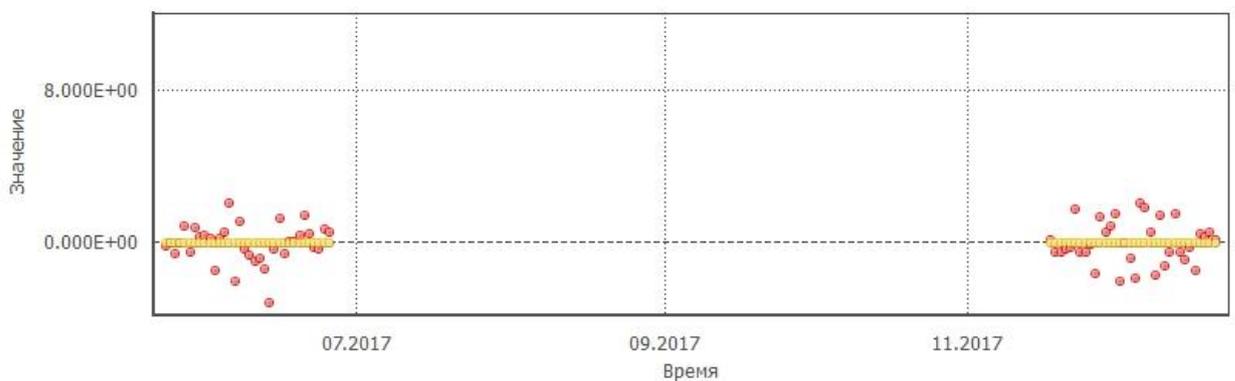


Рисунок А.32 – Реализации определения промежуточного коэффициента $C_4^{(1)}(\gamma)$ и построенная по ним модель с использованием уточненных коэффициентов $A_{44}^{(1)}$ НКА №720 для «теневого» сезонов



Рисунок А.33 – Реализации определения промежуточного коэффициента $D_1^{(1)}(\gamma)$ и построенная по ним модель с использованием уточненных коэффициентов $B_{11}^{(1)}, B_{21}^{(1)}, B_{31}^{(1)}, B_{41}^{(1)}$ НКА №720 для «теневого» сезонов

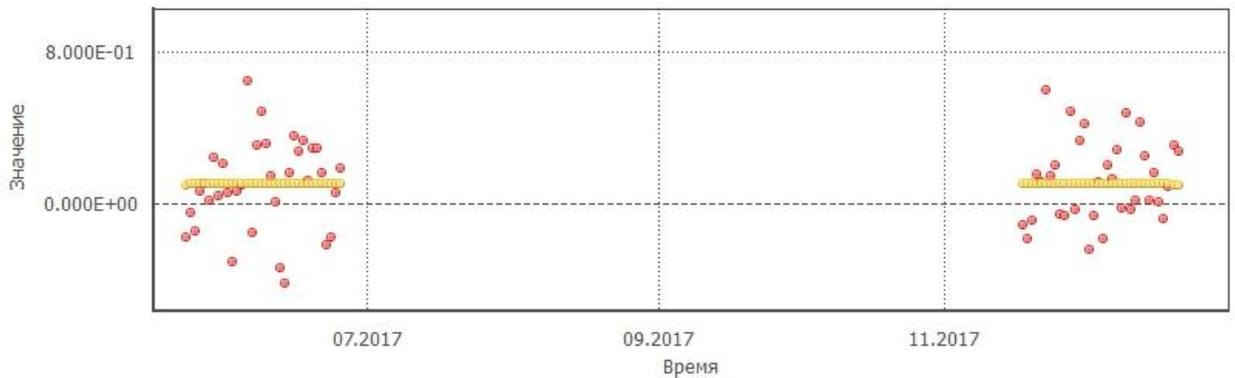


Рисунок А.34 – Реализации определения промежуточного коэффициента $D_2^{(1)}(\gamma)$ и построенная по ним модель с использованием уточненных коэффициентов $B_{22}^{(1)}, B_{32}^{(1)}, B_{42}^{(1)}$ НКА №720 для «теневого» сезонов

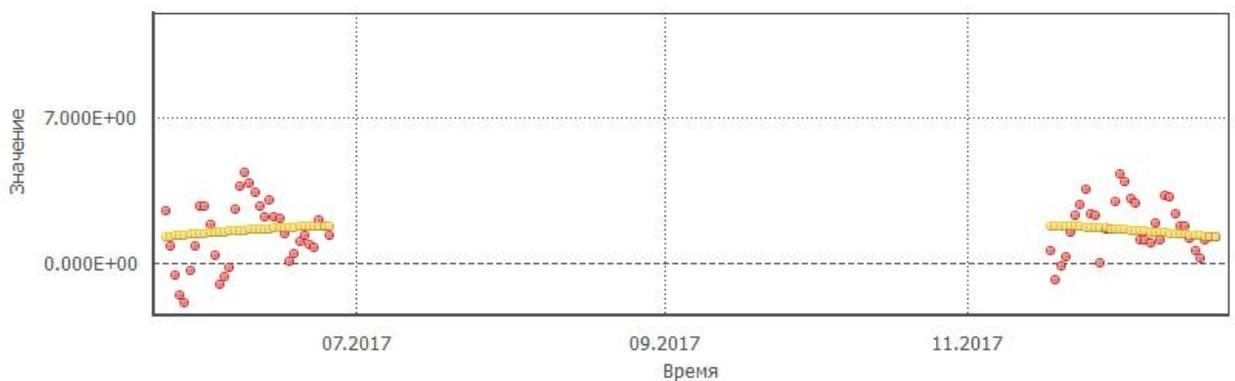


Рисунок А.35 – Реализации определения промежуточного коэффициента $D_3^{(1)}(\gamma)$ и построенная по ним модель с использованием уточненных коэффициентов $B_{33}^{(1)}, B_{43}^{(1)}$ НКА №720 для «теневого» сезонов

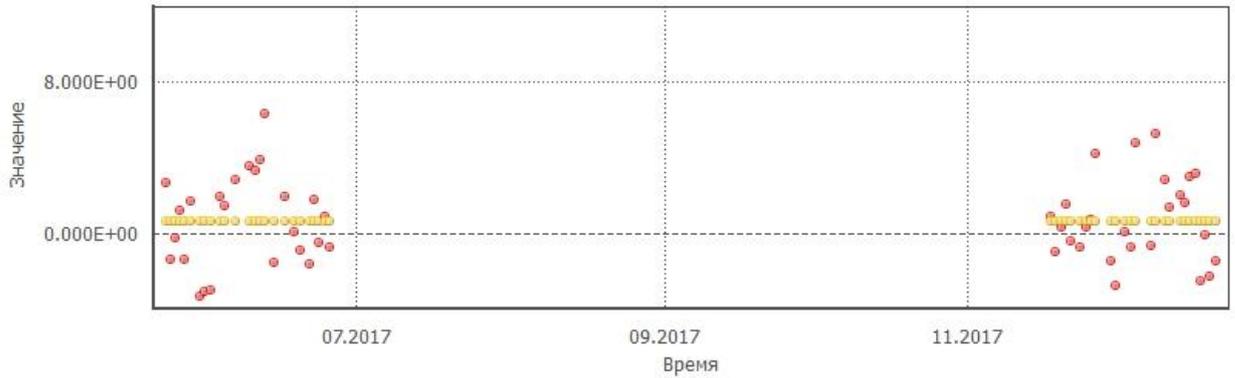


Рисунок А.36 – Реализации определения промежуточного коэффициента $D_4^{(1)}(\gamma)$ и построенная по ним модель с использованием уточненных коэффициентов $B_{44}^{(1)}$ НКА №720 для «теневого» сезонов

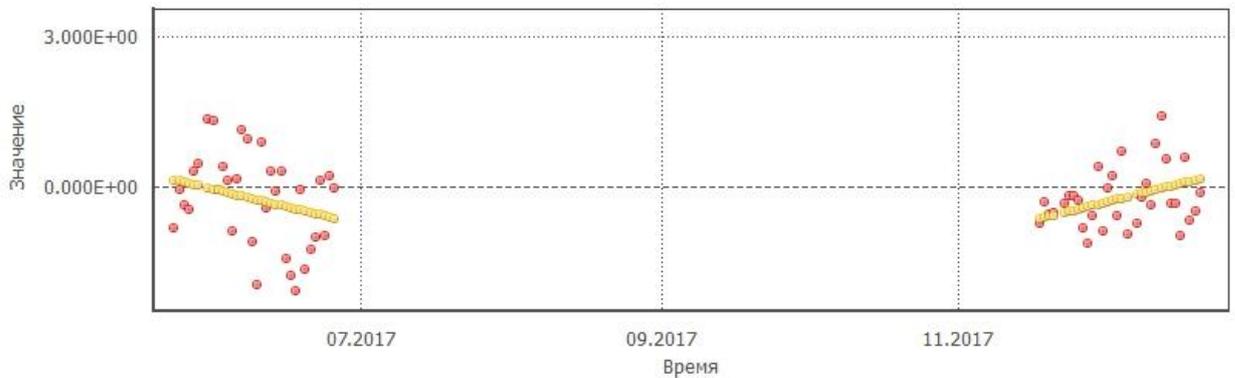


Рисунок А.37 – Реализации определения промежуточного коэффициента $C_0^{(2)}(\gamma)$ и построенная по ним модель с использованием уточненных коэффициентов $A_{00}^{(2)}, A_{10}^{(2)}, A_{20}^{(2)}, A_{30}^{(2)}, A_{40}^{(2)}$ НКА №720 для «теневого» сезонов

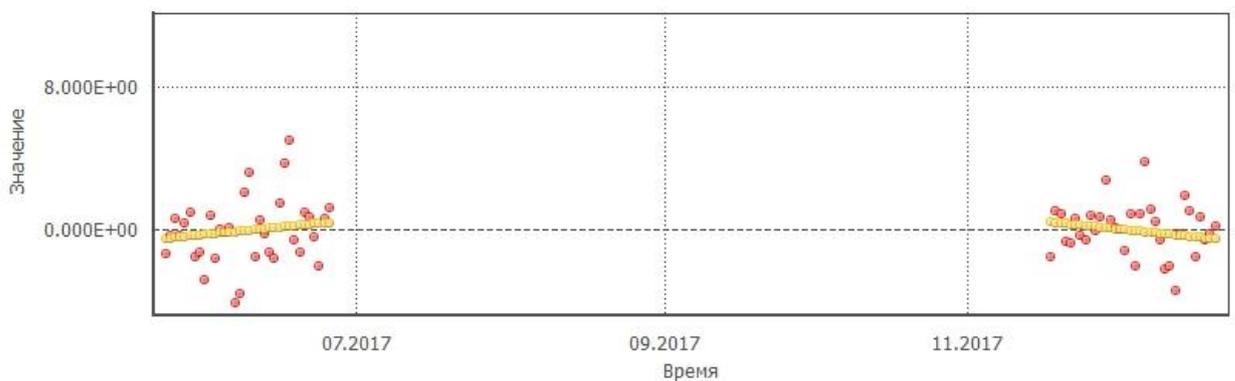


Рисунок А.38 – Реализации определения промежуточного коэффициента $C_1^{(2)}(\gamma)$ и построенная по ним модель с использованием уточненных коэффициентов $A_{11}^{(2)}, A_{21}^{(2)}, A_{31}^{(2)}, A_{41}^{(2)}$ НКА №720 для «теневого» сезонов

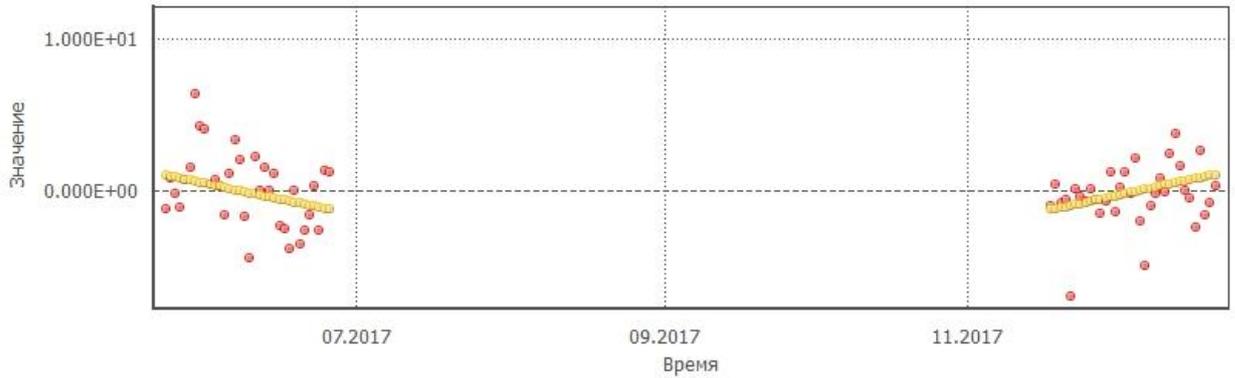


Рисунок А.39 – Реализации определения промежуточного коэффициента $C_2^{(2)}(\gamma)$ и построенная по ним модель с использованием уточненных коэффициентов $A_{22}^{(2)}, A_{32}^{(2)}, A_{42}^{(2)}$ НКА №720 для «теневого» сезонов

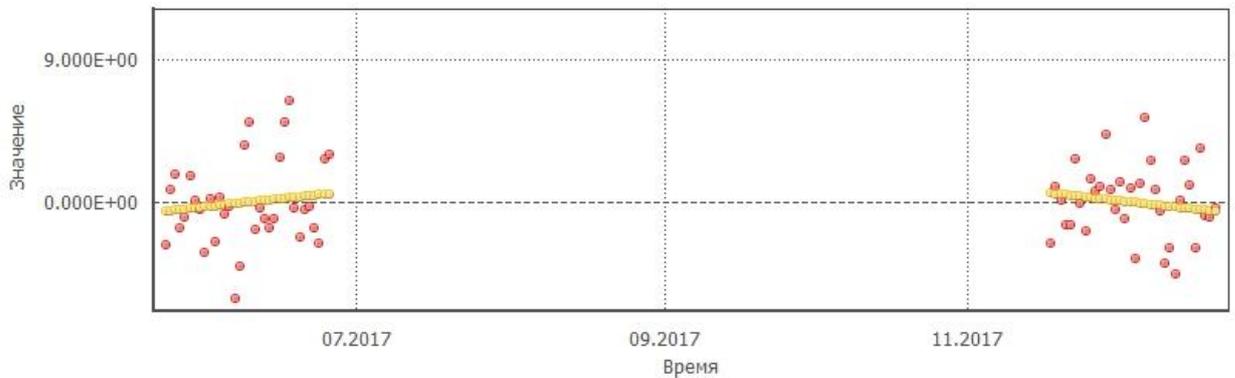


Рисунок А.40 – Реализации определения промежуточного коэффициента $C_3^{(2)}(\gamma)$ и построенная по ним модель с использованием уточненных коэффициентов $A_{33}^{(2)}, A_{43}^{(2)}$ НКА №720 для «теневого» сезонов

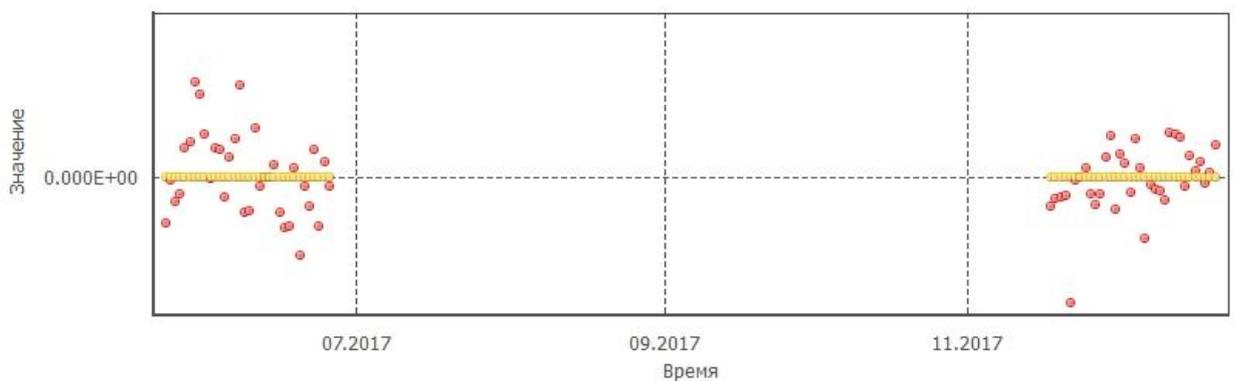


Рисунок А.41 – Реализации определения промежуточного коэффициента $C_4^{(2)}(\gamma)$ и построенная по ним модель с использованием уточненных коэффициентов $A_{44}^{(2)}$ НКА №720 для «теневого» сезонов

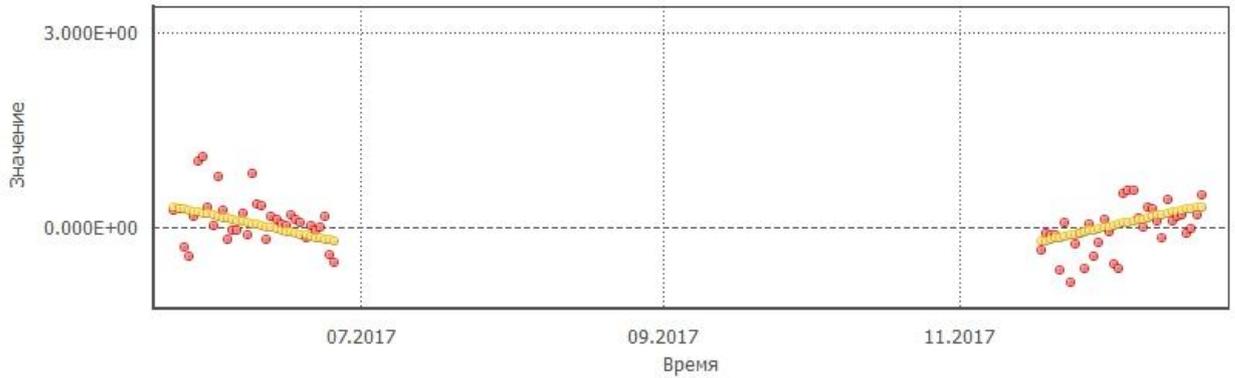


Рисунок А.42 – Реализации определения промежуточного коэффициента $D_1^{(2)}(\gamma)$ и построенная по ним модель с использованием уточненных коэффициентов $B_{11}^{(2)}, B_{21}^{(2)}, B_{31}^{(2)}, B_{41}^{(2)}$ НКА №720 для «теневого» сезонов

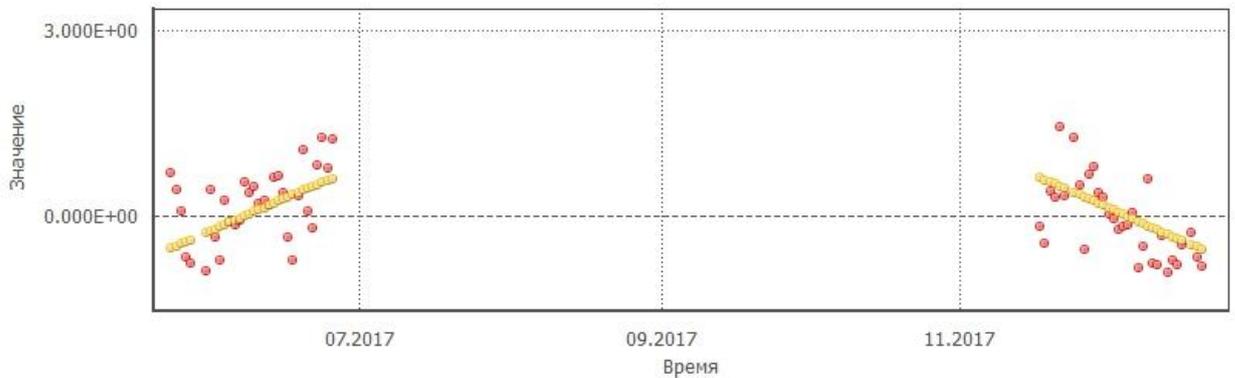


Рисунок А.43 – Реализации определения промежуточного коэффициента $D_2^{(2)}(\gamma)$ и построенная по ним модель с использованием уточненных коэффициентов $B_{22}^{(2)}, B_{32}^{(2)}, B_{42}^{(2)}$ НКА №720 для «теневого» сезонов

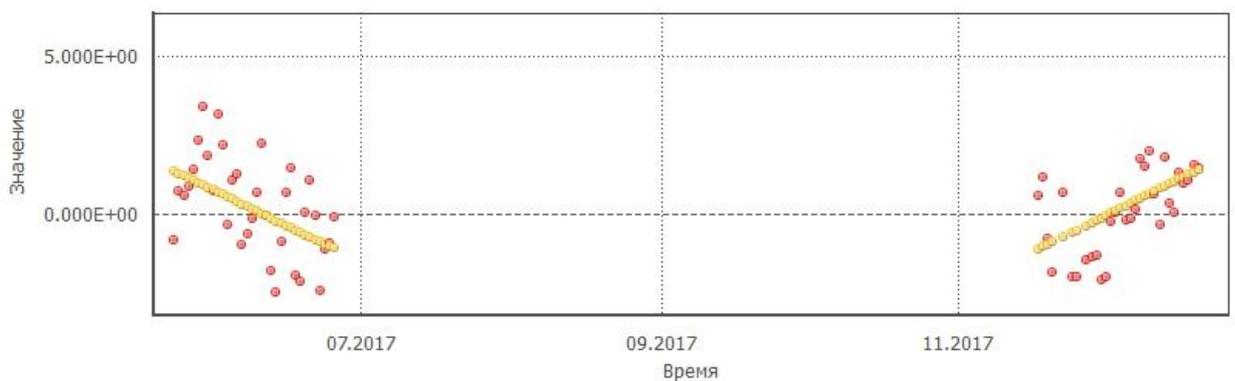


Рисунок А.44 – Реализации определения промежуточного коэффициента $D_3^{(2)}(\gamma)$ и построенная по ним модель с использованием уточненных коэффициентов $B_{33}^{(2)}, B_{43}^{(2)}$ НКА №720 для «теневого» сезонов

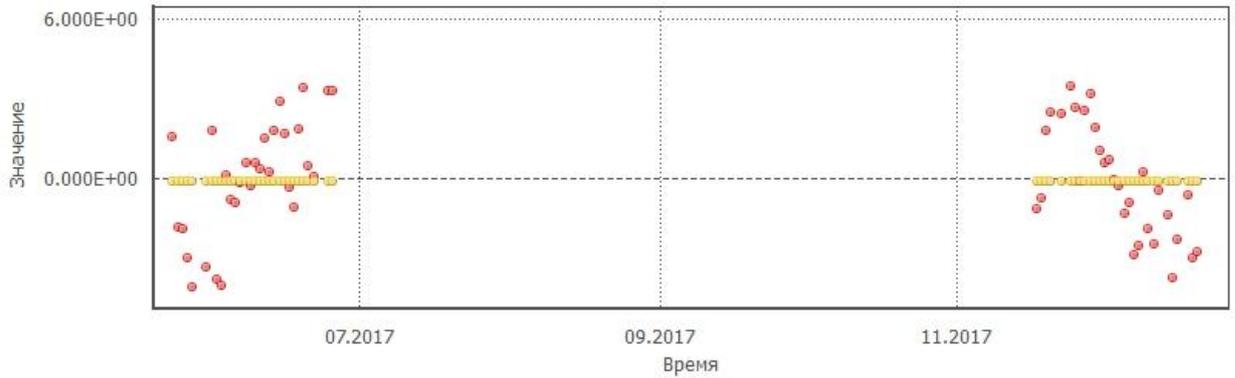


Рисунок А.45 – Реализации определения промежуточного коэффициента $D_4^{(2)}(\gamma)$ и построенная по ним модель с использованием уточненных коэффициентов $B_{44}^{(2)}$ НККА №720 для «теневых» сезонов

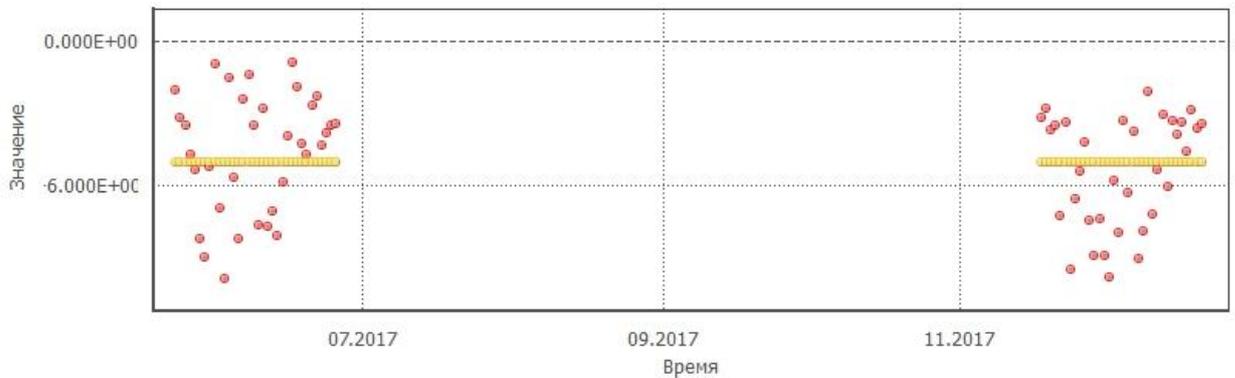


Рисунок А.46 – Реализации определения промежуточного коэффициента $C_0^{(3)}(\gamma)$ и построенная по ним модель с использованием уточненных коэффициентов $A_{00}^{(3)}, A_{10}^{(3)}, A_{20}^{(3)}, A_{30}^{(3)}, A_{40}^{(3)}$ НККА №720 для «теневых» сезонов

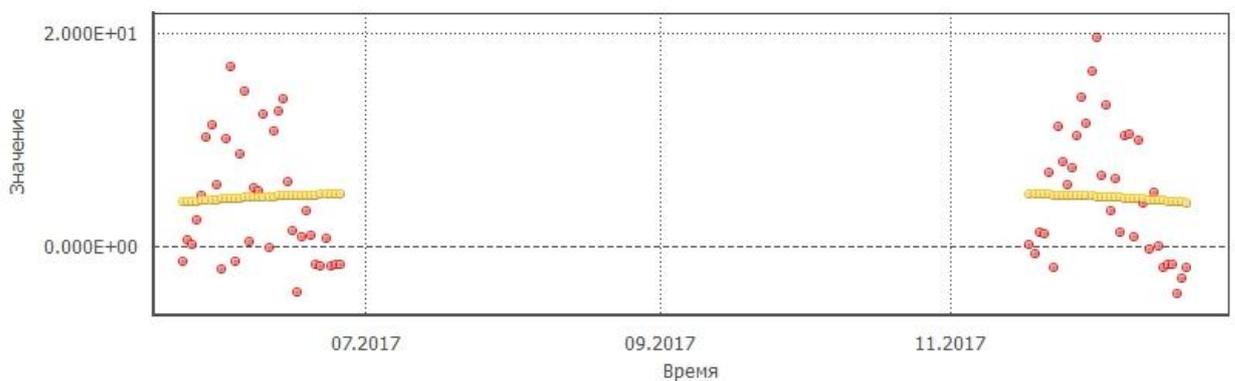


Рисунок А.47 – Реализации определения промежуточного коэффициента $C_1^{(3)}(\gamma)$ и построенная по ним модель с использованием уточненных коэффициентов $A_{11}^{(3)}, A_{21}^{(3)}, A_{31}^{(3)}, A_{41}^{(3)}$ НККА №720 для «теневых» сезонов

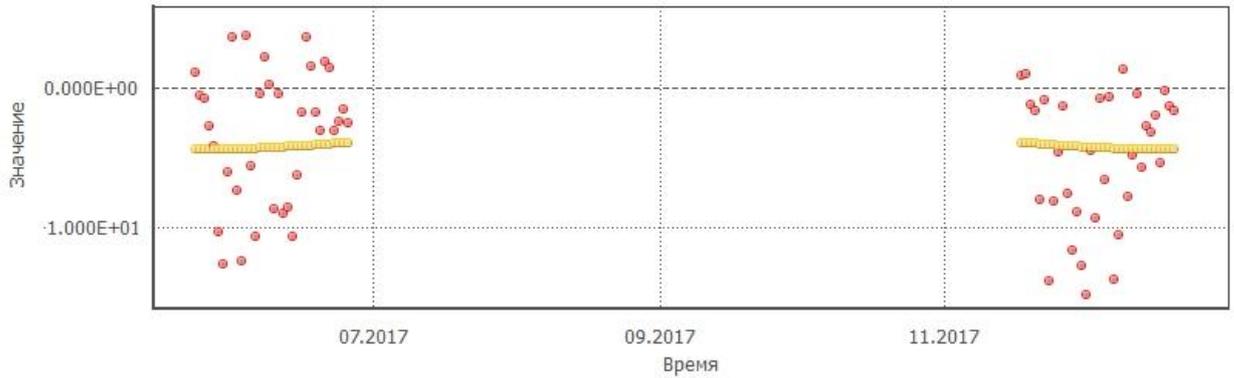


Рисунок А.48 – Реализации определения промежуточного коэффициента $C_2^{(3)}(\gamma)$ и построенная по ним модель с использованием уточненных коэффициентов $A_{22}^{(3)}, A_{32}^{(3)}, A_{42}^{(3)}$ НКА №720 для «теневого» сезонов

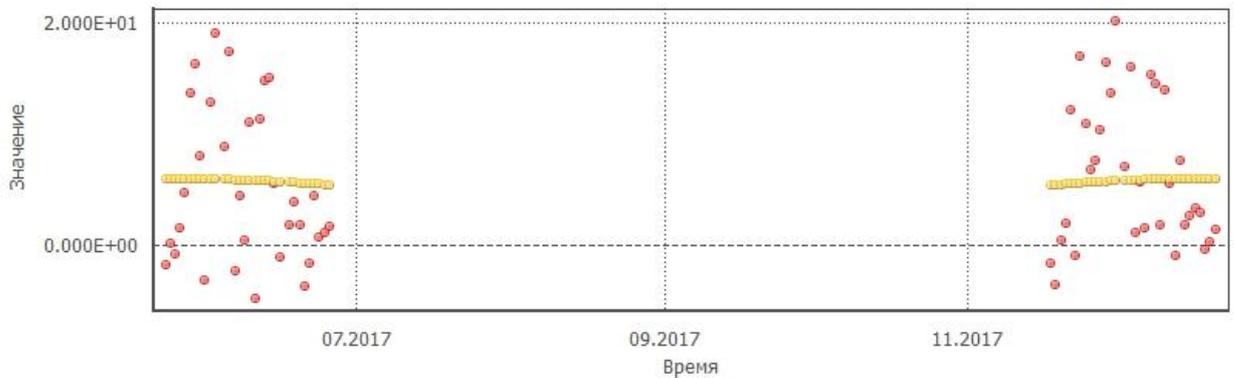


Рисунок А.49 – Реализации определения промежуточного коэффициента $C_3^{(3)}(\gamma)$ и построенная по ним модель с использованием уточненных коэффициентов $A_{33}^{(3)}, A_{43}^{(3)}$ НКА №720 для «теневого» сезонов

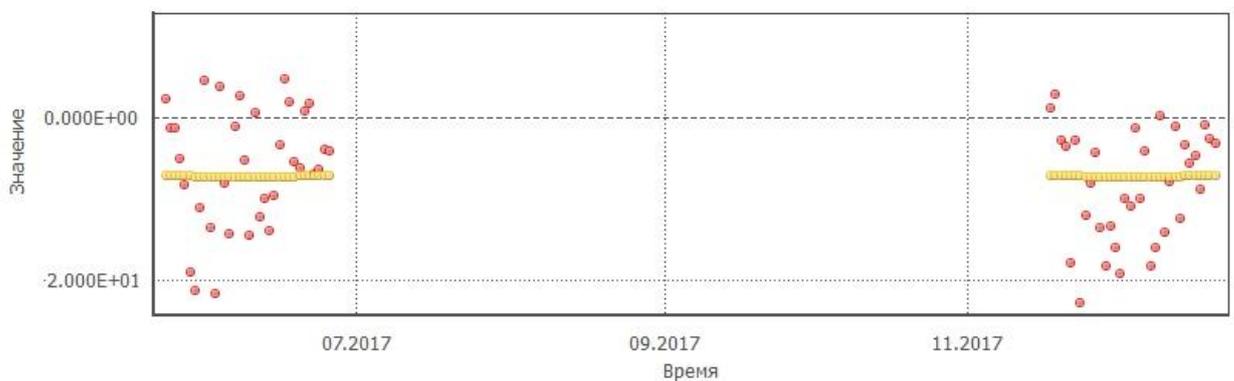


Рисунок А.50 – Реализации определения промежуточного коэффициента $C_4^{(3)}(\gamma)$ и построенная по ним модель с использованием уточненных коэффициентов $A_{44}^{(3)}$ НКА №720 для «теневого» сезонов

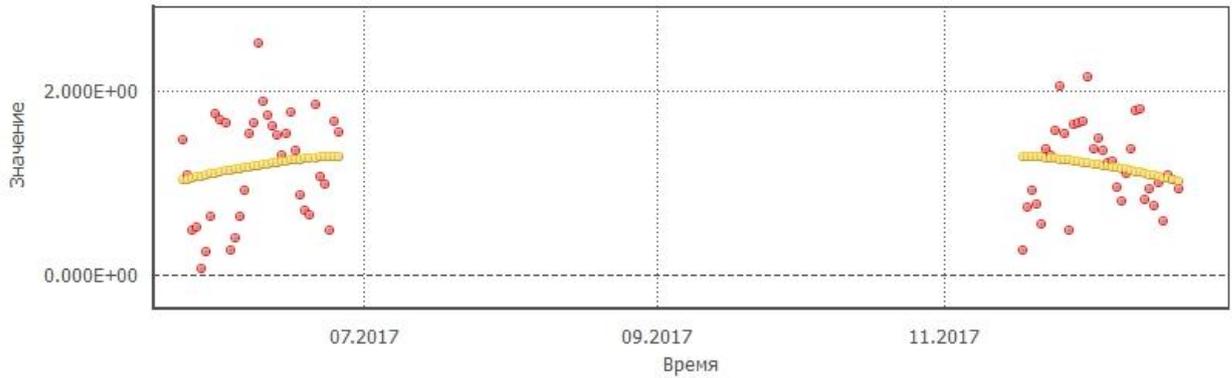


Рисунок А.51 – Реализации определения промежуточного коэффициента $D_1^{(3)}(\gamma)$ и построенная по ним модель с использованием уточненных коэффициентов $B_{11}^{(3)}, B_{21}^{(3)}, B_{31}^{(3)}, B_{41}^{(3)}$ НКА №720 для «теневого» сезонов

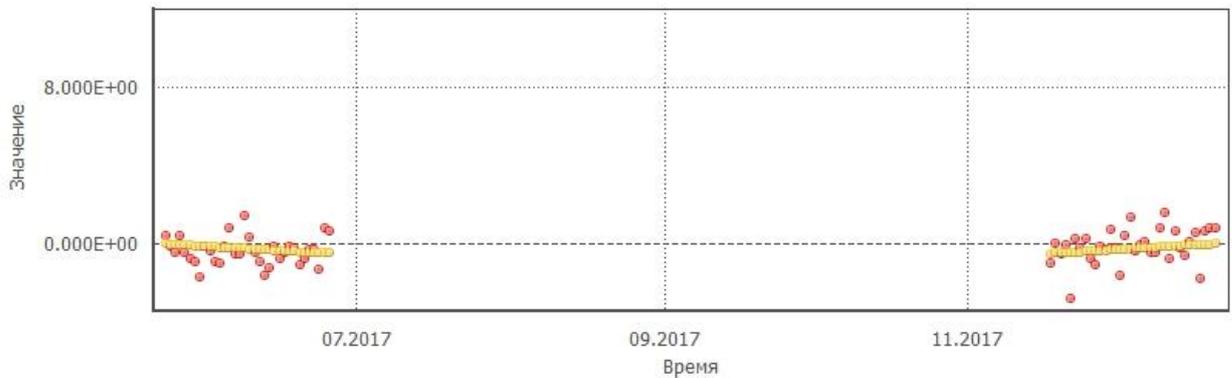


Рисунок А.52 – Реализации определения промежуточного коэффициента $D_2^{(3)}(\gamma)$ и построенная по ним модель с использованием уточненных коэффициентов $B_{22}^{(3)}, B_{32}^{(3)}, B_{42}^{(3)}$ НКА №720 для «теневого» сезонов

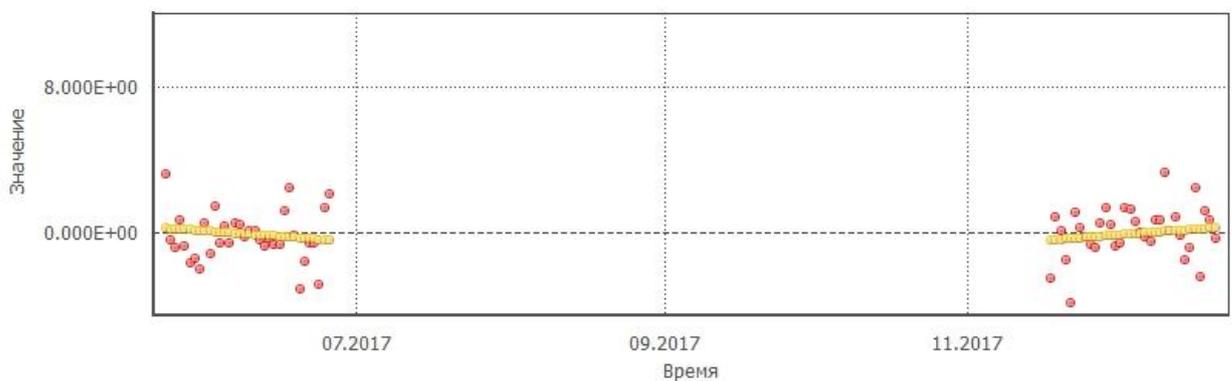


Рисунок А.53 – Реализации определения промежуточного коэффициента $D_3^{(3)}(\gamma)$ и построенная по ним модель с использованием уточненных коэффициентов $B_{33}^{(3)}, B_{43}^{(3)}$ НКА №720 для «теневого» сезонов

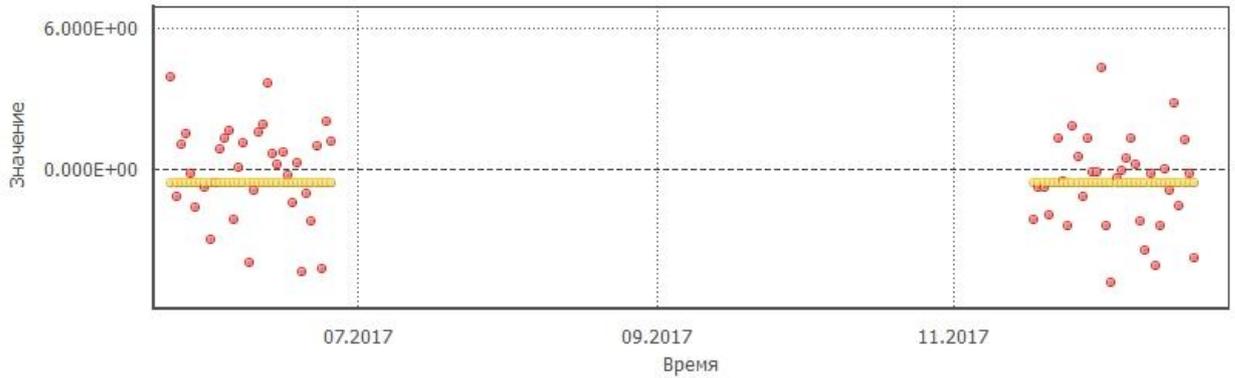


Рисунок А.54 – Реализации определения промежуточного коэффициента $D_4^{(3)}(\gamma)$ и построенная по ним модель с использованием уточненных коэффициентов $B_{44}^{(3)}$ НКА №720 для «теневых» сезонов

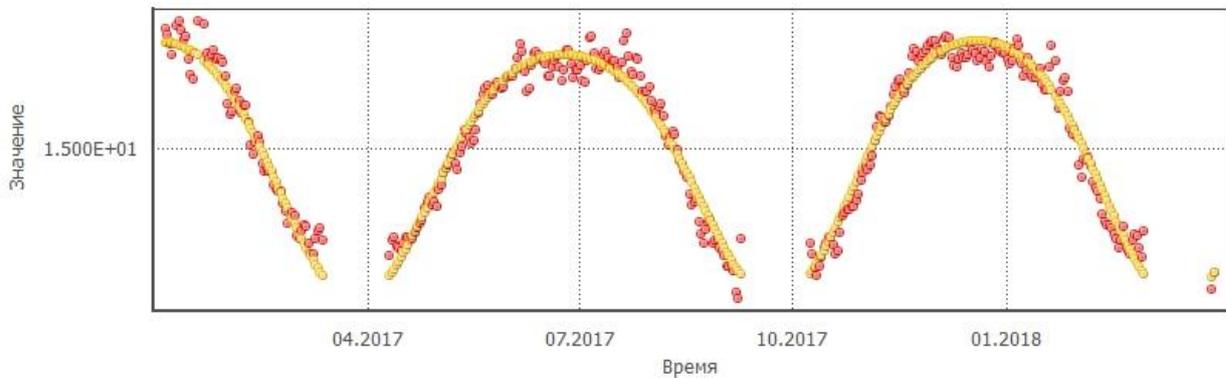


Рисунок А.55 – Реализации определения промежуточного коэффициента $C_0^{(1)}(\gamma)$ и построенная по ним модель с использованием уточненных коэффициентов $A_{00}^{(1)}, A_{10}^{(1)}, A_{20}^{(1)}, A_{30}^{(1)}, A_{40}^{(1)}$ НКА №743 для «бестеневых» сезонов

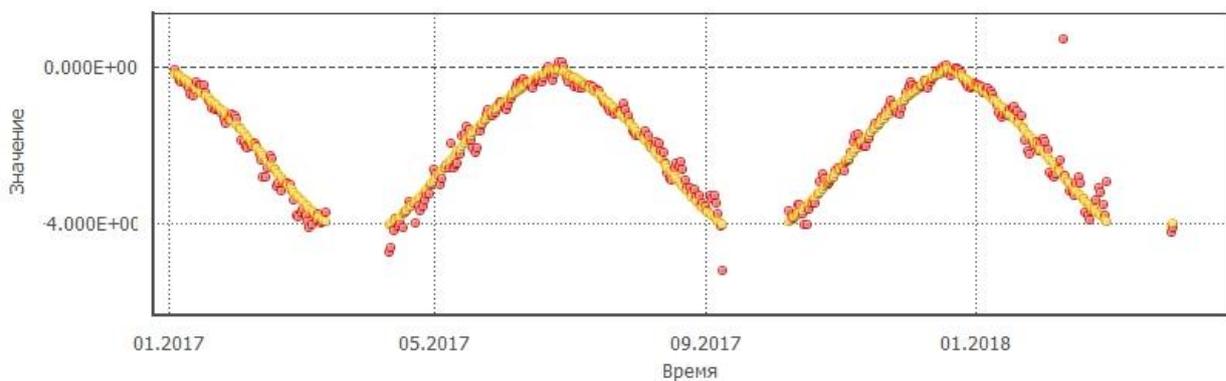


Рисунок А.56 – Реализации определения промежуточного коэффициента $C_1^{(1)}(\gamma)$ и построенная по ним модель с использованием уточненных коэффициентов $A_{11}^{(1)}, A_{21}^{(1)}, A_{31}^{(1)}, A_{41}^{(1)}$ НКА №743 для «бестеневых» сезонов

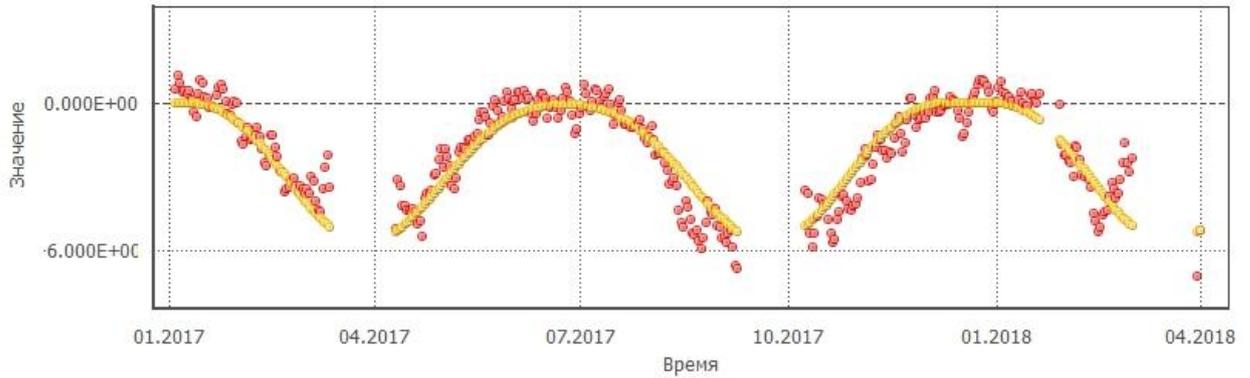


Рисунок А.57 – Реализации определения промежуточного коэффициента $C_2^{(1)}(\gamma)$ и построенная по ним модель с использованием уточненных коэффициентов $A_{22}^{(1)}, A_{32}^{(1)}, A_{42}^{(1)}$ НКА №743 для «бестеневых» сезонов

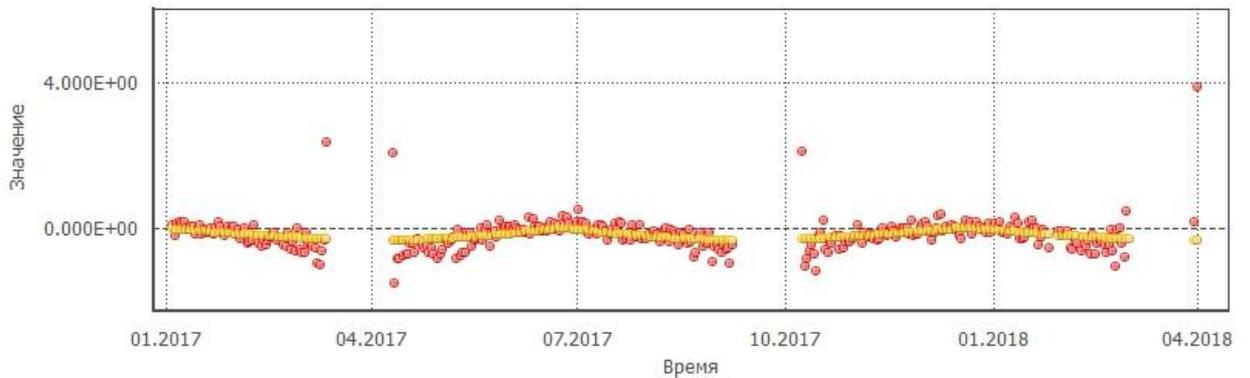


Рисунок А.58 – Реализации определения промежуточного коэффициента $C_3^{(1)}(\gamma)$ и построенная по ним модель с использованием уточненных коэффициентов $A_{33}^{(1)}, A_{43}^{(1)}$ НКА №743 для «бестеневых» сезонов

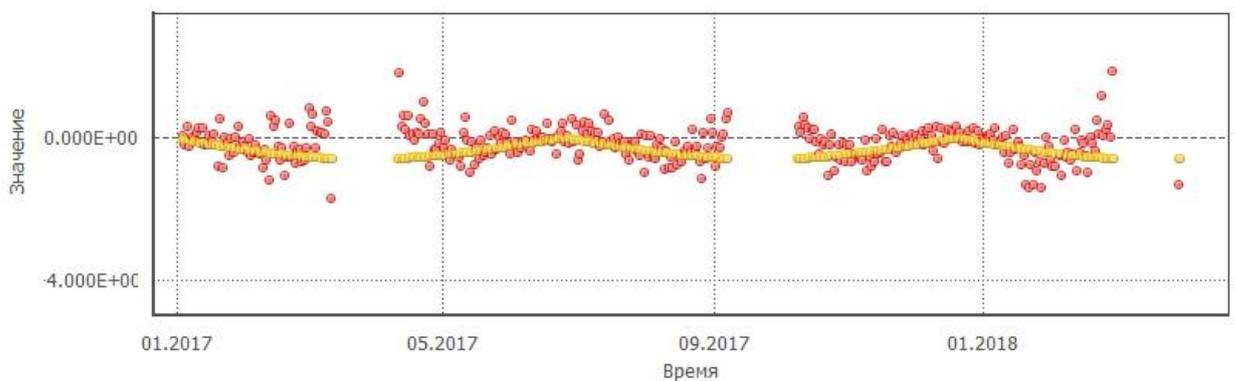


Рисунок А.59 – Реализации определения промежуточного коэффициента $C_4^{(1)}(\gamma)$ и построенная по ним модель с использованием уточненных коэффициентов $A_{44}^{(1)}$ НКА №743 для «бестеневых» сезонов

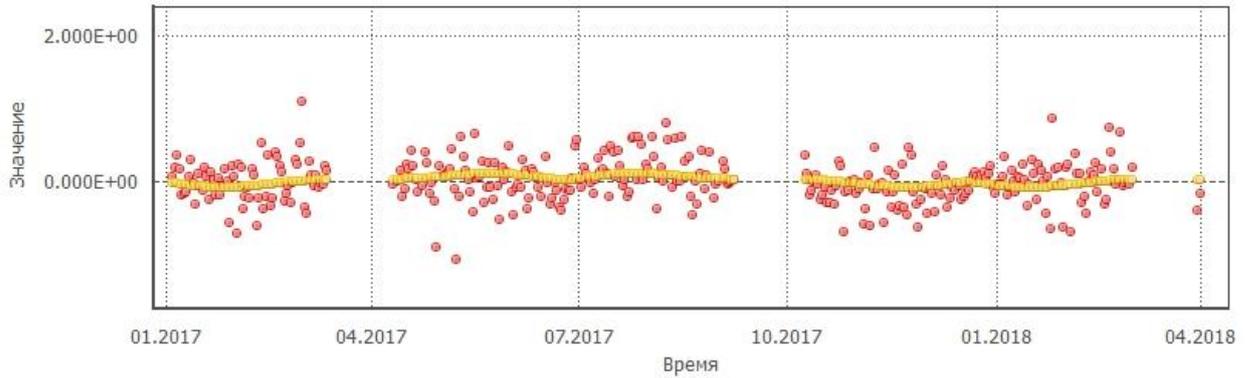


Рисунок А.60 – Реализации определения промежуточного коэффициента $D_1^{(1)}(\gamma)$ и построенная по ним модель с использованием уточненных коэффициентов $B_{11}^{(1)}, B_{21}^{(1)}, B_{31}^{(1)}, B_{41}^{(1)}$ НКА №743 для «бестеневых» сезонов

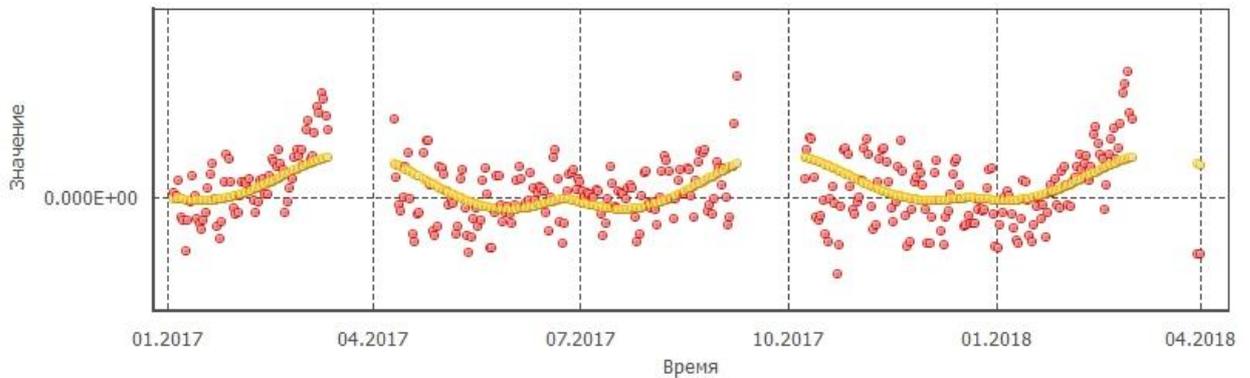


Рисунок А.61 – Реализации определения промежуточного коэффициента $D_2^{(1)}(\gamma)$ и построенная по ним модель с использованием уточненных коэффициентов $B_{22}^{(1)}, B_{32}^{(1)}, B_{42}^{(1)}$ НКА №743 для «бестеневых» сезонов

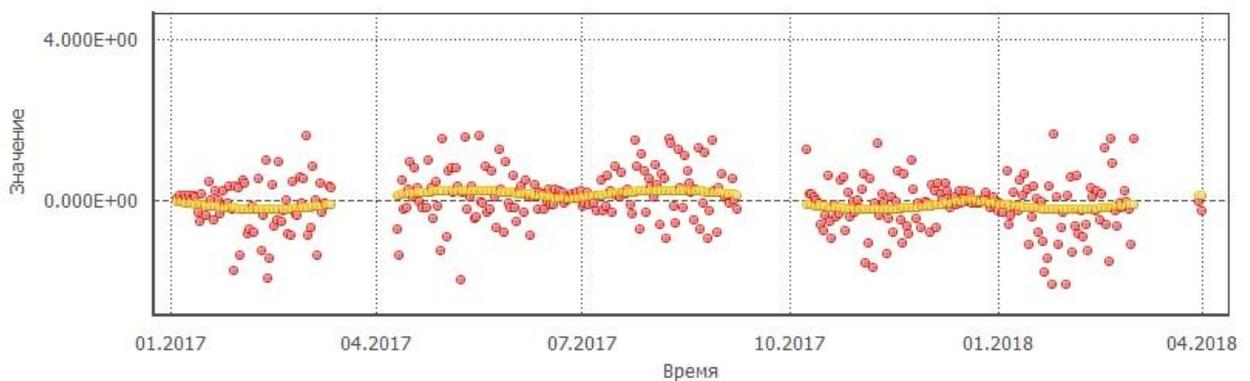


Рисунок А.62 – Реализации определения промежуточного коэффициента $D_3^{(1)}(\gamma)$ и построенная по ним модель с использованием уточненных коэффициентов $B_{33}^{(1)}, B_{43}^{(1)}$ НКА №743 для «бестеневых» сезонов

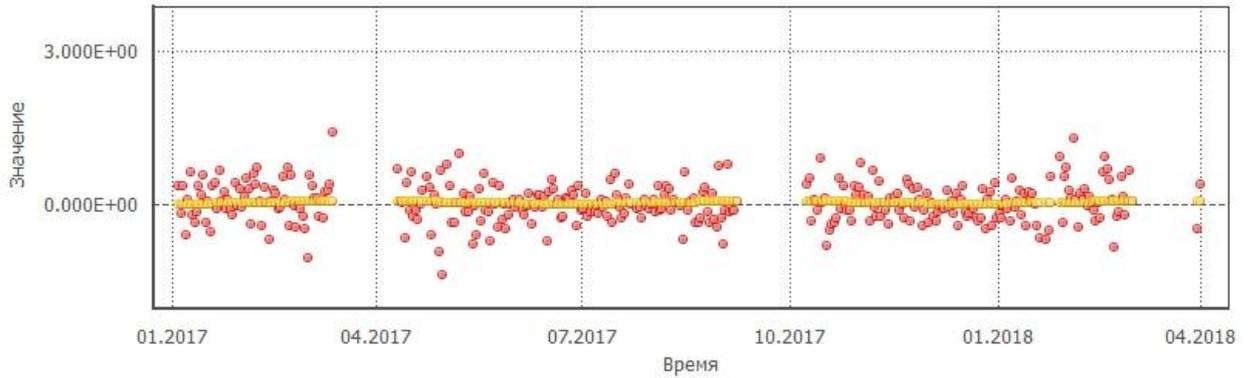


Рисунок А.63 – Реализации определения промежуточного коэффициента $D_4^{(1)}(\gamma)$ и построенная по ним модель с использованием уточненных коэффициентов $B_{44}^{(1)}$ НКА №743 для «бестеневых» сезонов

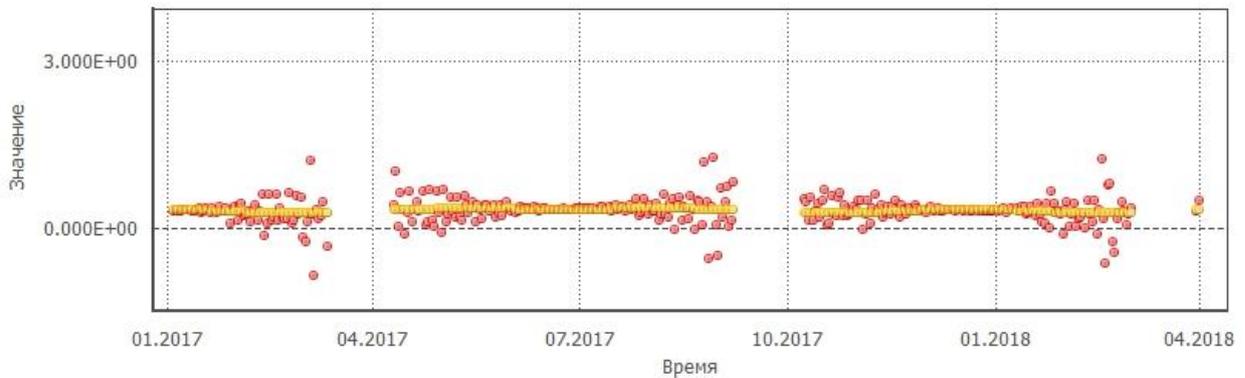


Рисунок А.64 – Реализации определения промежуточного коэффициента $C_0^{(2)}(\gamma)$ и построенная по ним модель с использованием уточненных коэффициентов $A_{00}^{(2)}, A_{10}^{(2)}, A_{20}^{(2)}, A_{30}^{(2)}, A_{40}^{(2)}$ НКА №743 для «бестеневых» сезонов

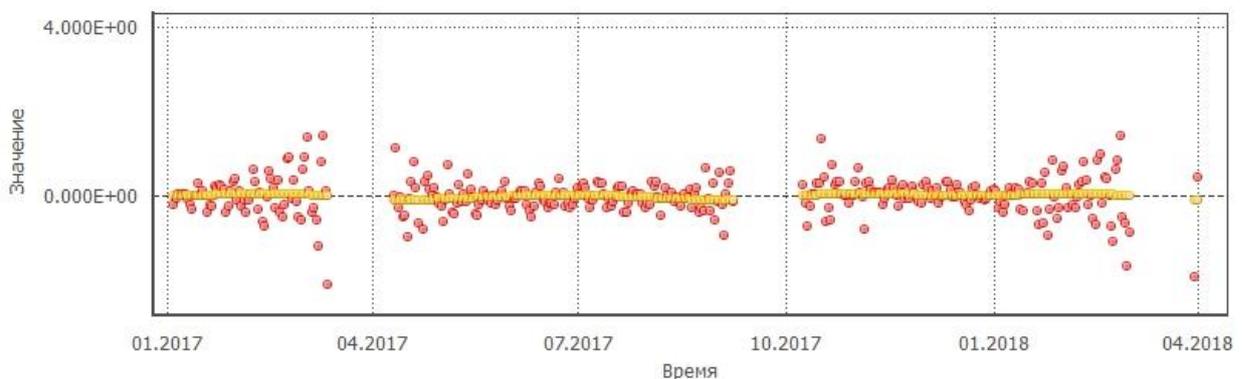


Рисунок А.65 – Реализации определения промежуточного коэффициента $C_1^{(2)}(\gamma)$ и построенная по ним модель с использованием уточненных коэффициентов $A_{11}^{(2)}, A_{21}^{(2)}, A_{31}^{(2)}, A_{41}^{(2)}$ НКА №743 для «бестеневых» сезонов

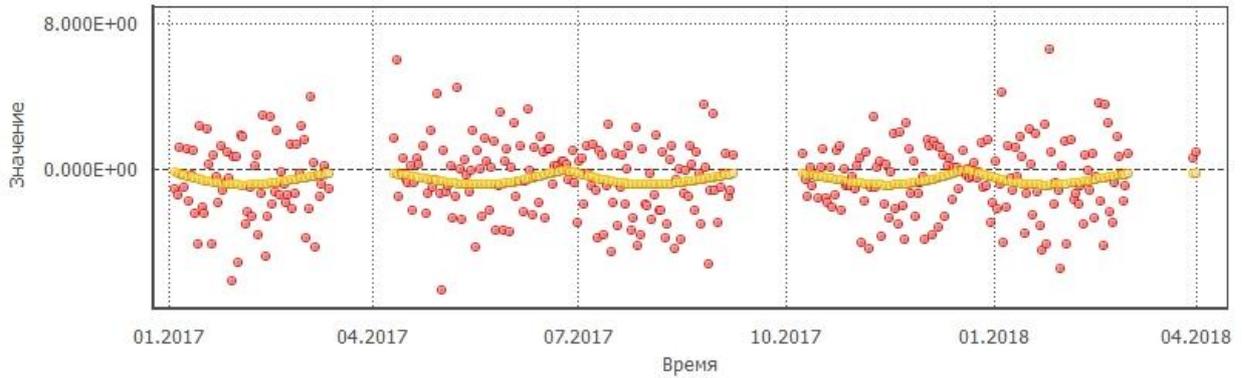


Рисунок А.66 – Реализации определения промежуточного коэффициента $C_2^{(2)}(\gamma)$ и построенная по ним модель с использованием уточненных коэффициентов $A_{22}^{(2)}, A_{32}^{(2)}, A_{42}^{(2)}$ НКА №743 для «бестеневых» сезонов

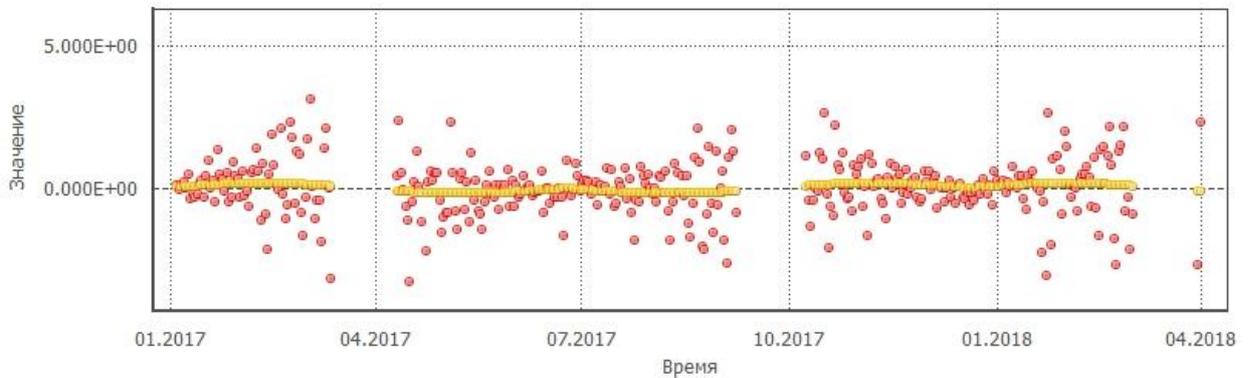


Рисунок А.67 – Реализации определения промежуточного коэффициента $C_3^{(2)}(\gamma)$ и построенная по ним модель с использованием уточненных коэффициентов $A_{33}^{(2)}, A_{43}^{(2)}$ НКА №743 для «бестеневых» сезонов

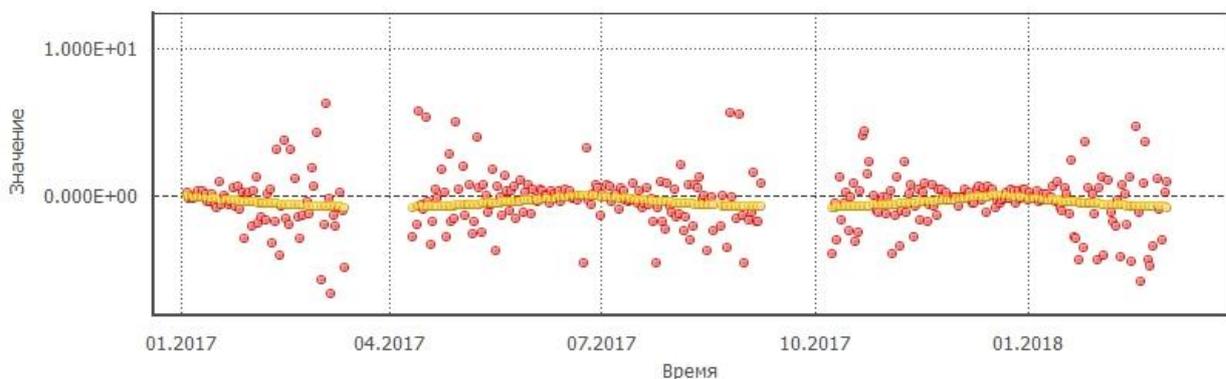


Рисунок А.68 – Реализации определения промежуточного коэффициента $C_4^{(2)}(\gamma)$ и построенная по ним модель с использованием уточненных коэффициентов $A_{44}^{(2)}$ НКА №743 для «бестеневых» сезонов

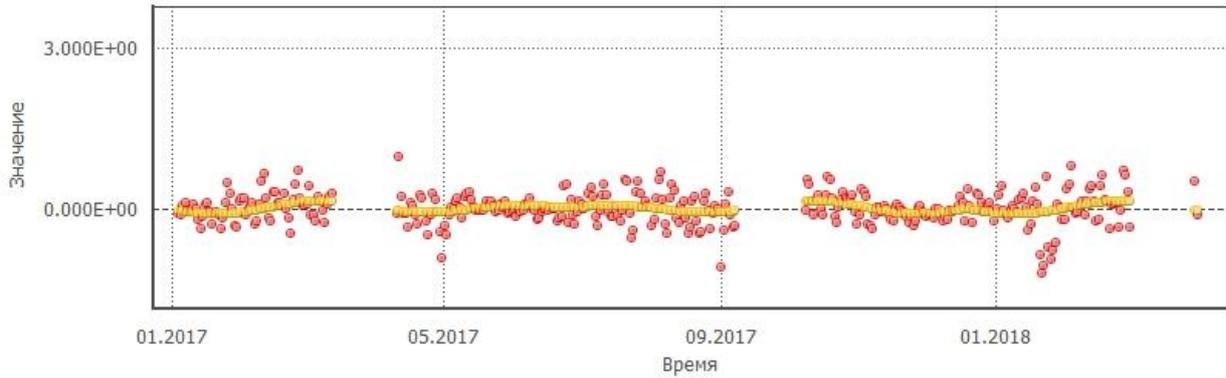


Рисунок А.69 – Реализации определения промежуточного коэффициента $D_1^{(2)}(\gamma)$ и построенная по ним модель с использованием уточненных коэффициентов $B_{11}^{(2)}, B_{21}^{(2)}, B_{31}^{(2)}, B_{41}^{(2)}$ НКА №743 для «бестеневых» сезонов

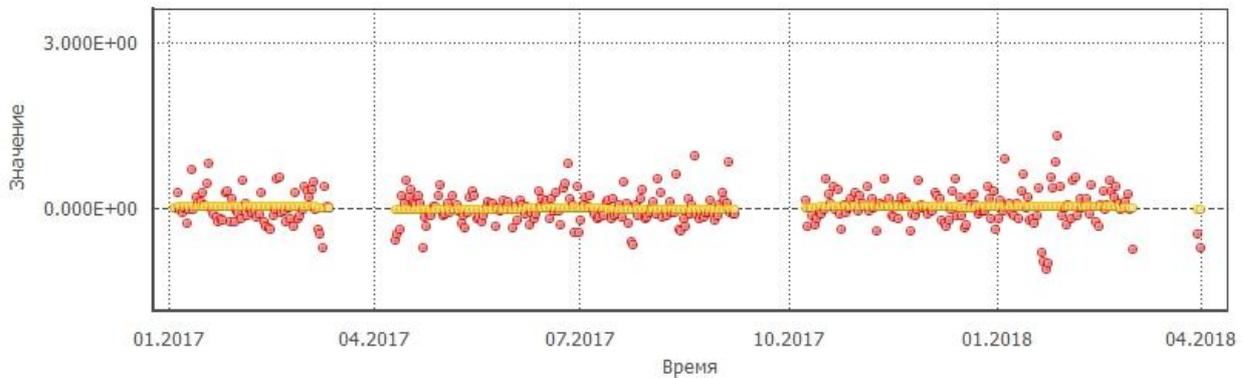


Рисунок А.70 – Реализации определения промежуточного коэффициента $D_2^{(2)}(\gamma)$ и построенная по ним модель с использованием уточненных коэффициентов $B_{22}^{(2)}, B_{32}^{(2)}, B_{42}^{(2)}$ НКА №743 для «бестеневых» сезонов

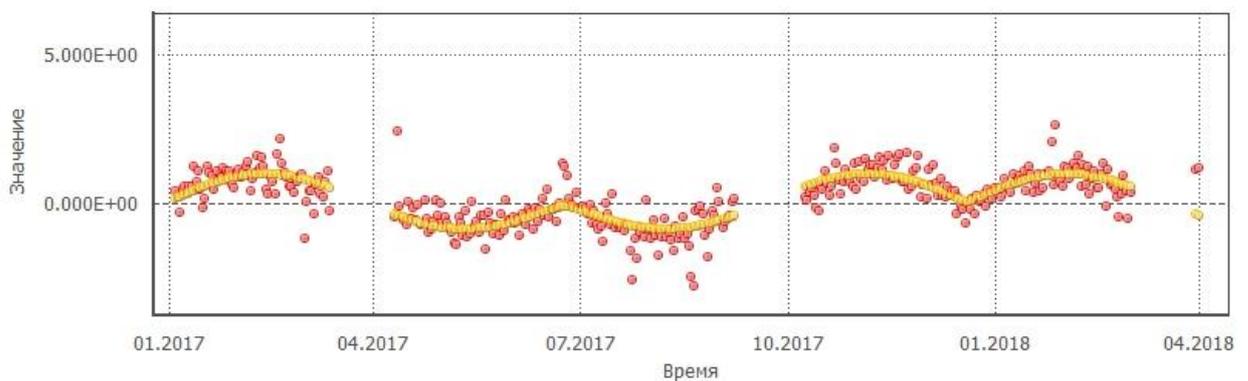


Рисунок А.71 – Реализации определения промежуточного коэффициента $D_3^{(2)}(\gamma)$ и построенная по ним модель с использованием уточненных коэффициентов $B_{33}^{(2)}, B_{43}^{(2)}$ НКА №743 для «бестеневых» сезонов

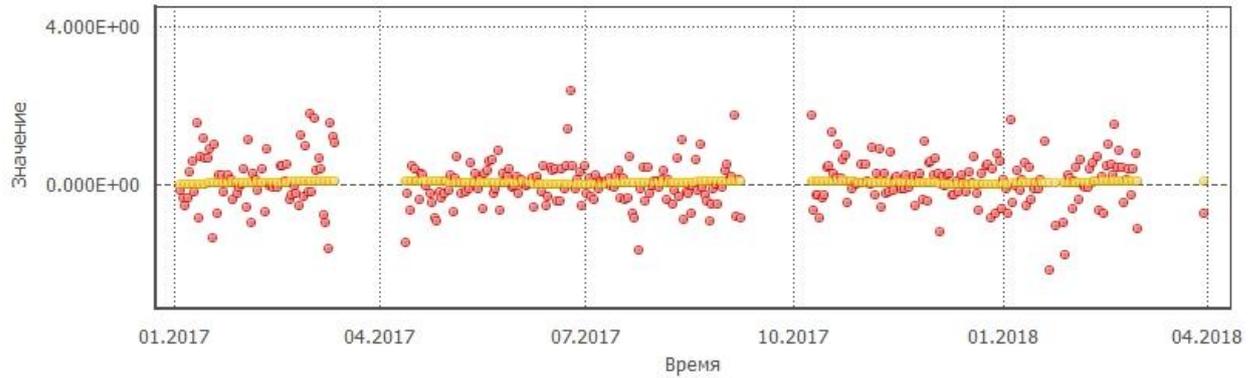


Рисунок А.72 – Реализации определения промежуточного коэффициента $D_4^{(2)}(\gamma)$ и построенная по ним модель с использованием уточненных коэффициентов $B_{44}^{(2)}$ НКА №743 для «бестеневых» сезонов

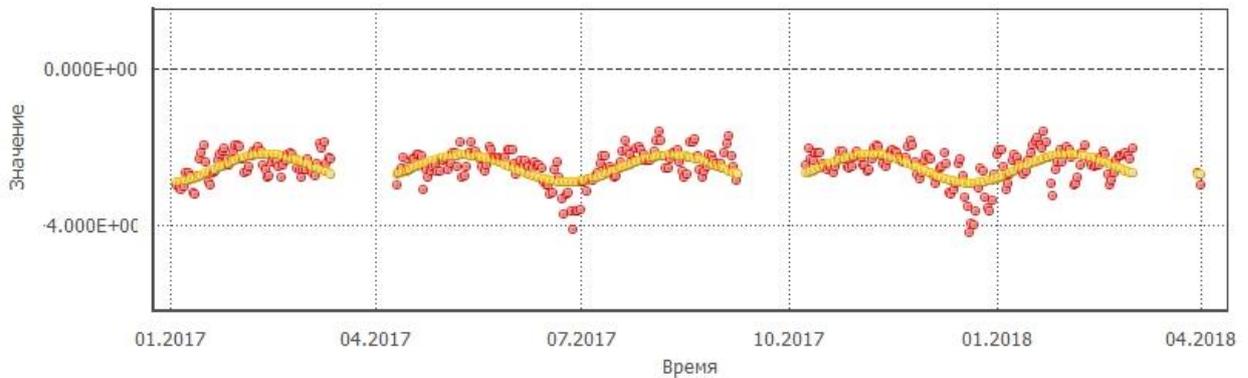


Рисунок А.73 – Реализации определения промежуточного коэффициента $C_0^{(3)}(\gamma)$ и построенная по ним модель с использованием уточненных коэффициентов $A_{00}^{(3)}, A_{10}^{(3)}, A_{20}^{(3)}, A_{30}^{(3)}, A_{40}^{(3)}$ НКА №743 для «бестеневых» сезонов

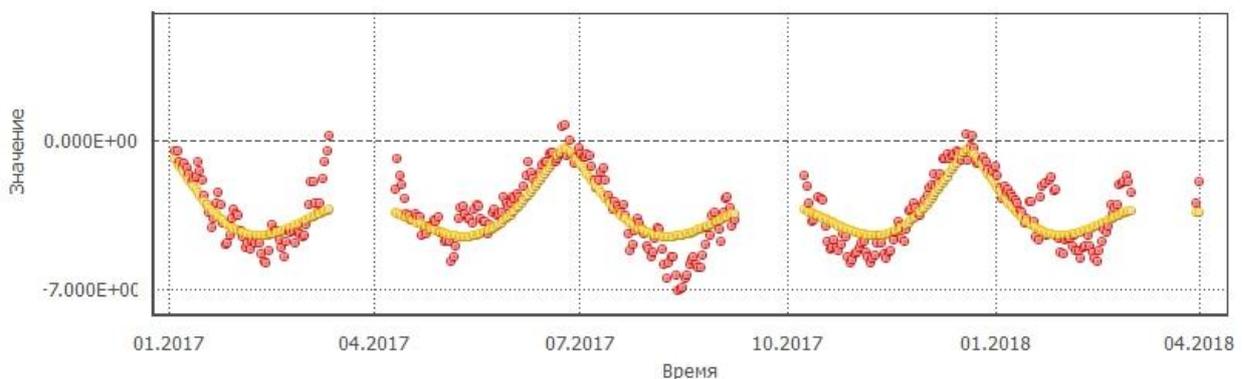


Рисунок А.74 – Реализации определения промежуточного коэффициента $C_1^{(3)}(\gamma)$ и построенная по ним модель с использованием уточненных коэффициентов $A_{11}^{(3)}, A_{21}^{(3)}, A_{31}^{(3)}, A_{41}^{(3)}$ НКА №743 для «бестеневых» сезонов

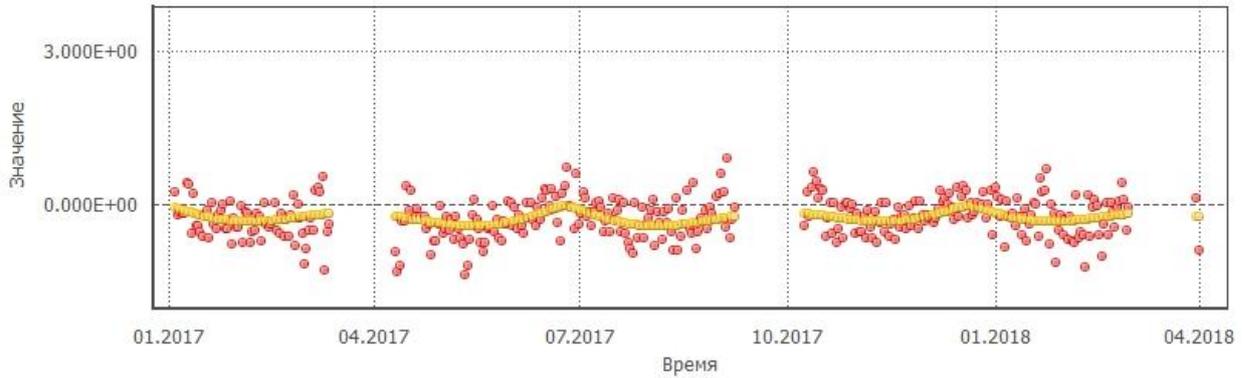


Рисунок А.75 – Реализации определения промежуточного коэффициента $C_2^{(3)}(\gamma)$ и построенная по ним модель с использованием уточненных коэффициентов $A_{22}^{(3)}, A_{32}^{(3)}, A_{42}^{(3)}$ НКА №743 для «бестеневых» сезонов

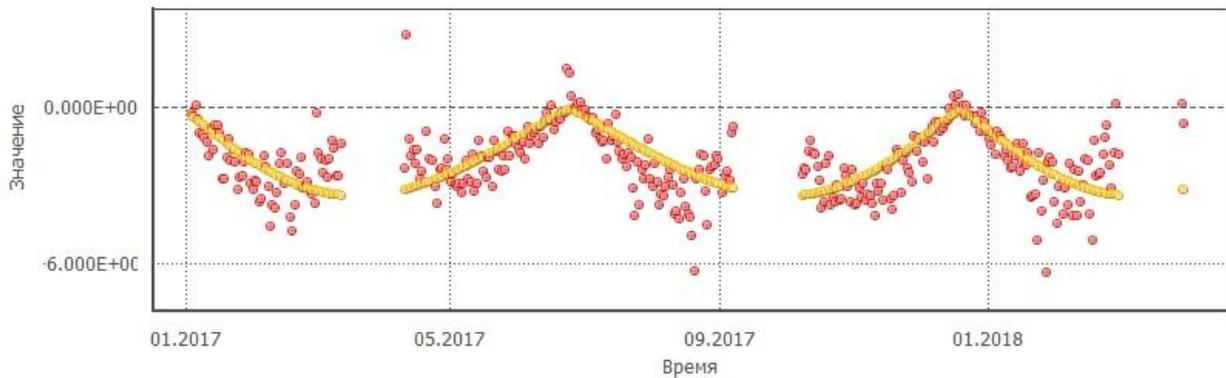


Рисунок А.76 – Реализации определения промежуточного коэффициента $C_3^{(3)}(\gamma)$ и построенная по ним модель с использованием уточненных коэффициентов $A_{33}^{(3)}, A_{43}^{(3)}$ НКА №743 для «бестеневых» сезонов

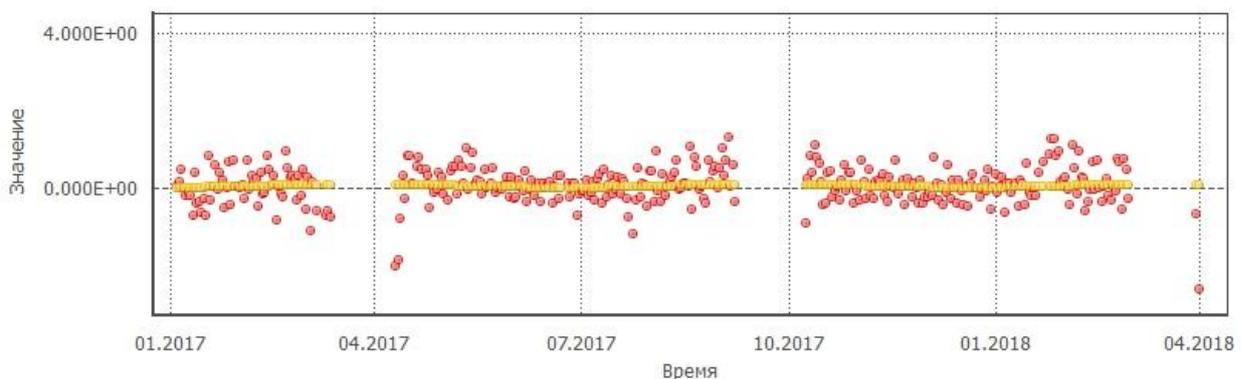


Рисунок А.77 – Реализации определения промежуточного коэффициента $C_4^{(3)}(\gamma)$ и построенная по ним модель с использованием уточненных коэффициентов $A_{44}^{(3)}$ НКА №743 для «бестеневых» сезонов

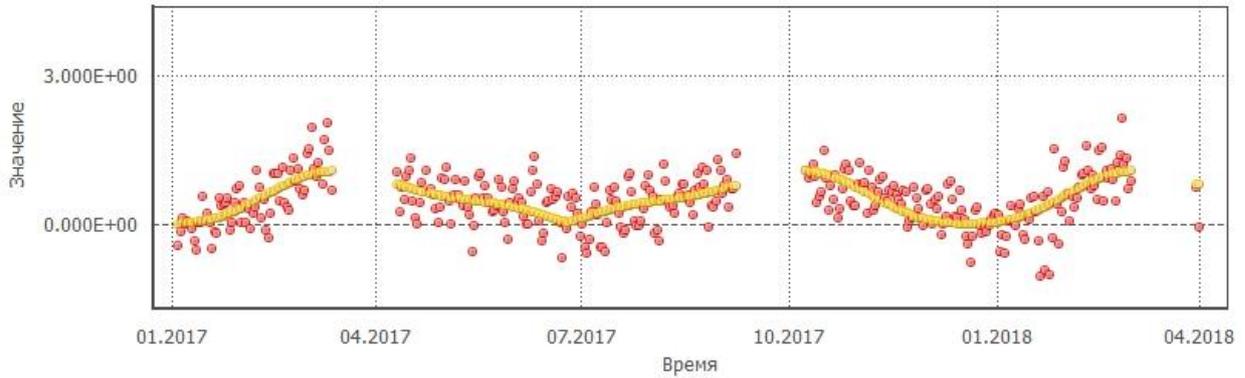


Рисунок А.78 – Реализации определения промежуточного коэффициента $D_1^{(3)}(\gamma)$ и построенная по ним модель с использованием уточненных коэффициентов $B_{11}^{(3)}, B_{21}^{(3)}, B_{31}^{(3)}, B_{41}^{(3)}$ НКА №743 для «бестеневых» сезонов

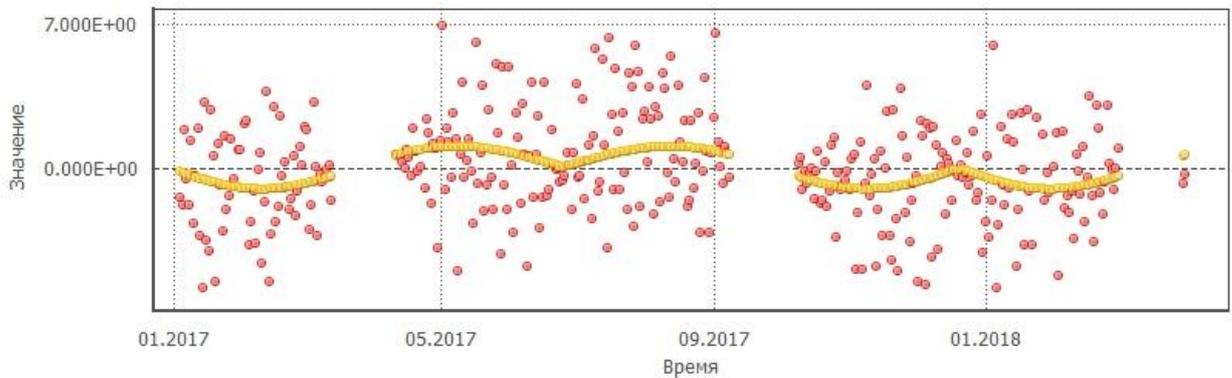


Рисунок А.79 – Реализации определения промежуточного коэффициента $D_2^{(3)}(\gamma)$ и построенная по ним модель с использованием уточненных коэффициентов $B_{22}^{(3)}, B_{32}^{(3)}, B_{42}^{(3)}$ НКА №743 для «бестеневых» сезонов

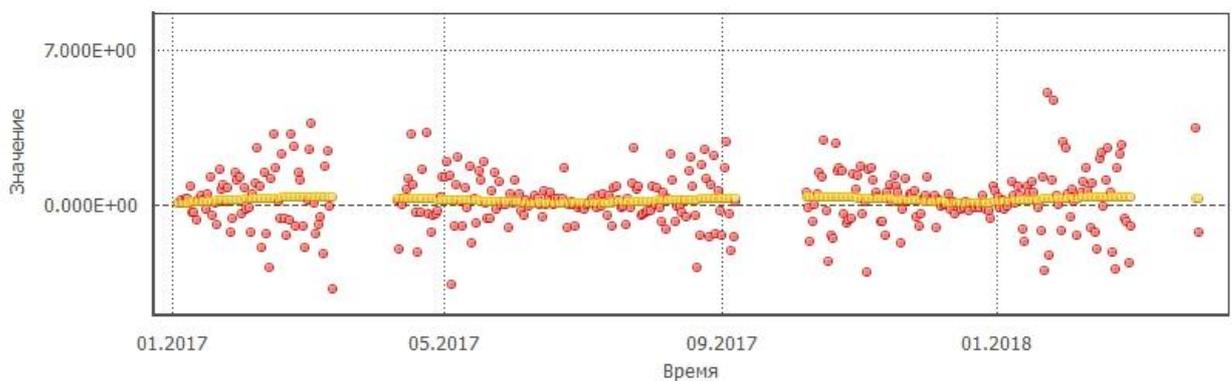


Рисунок А.80 – Реализации определения промежуточного коэффициента $D_3^{(3)}(\gamma)$ и построенная по ним модель с использованием уточненных коэффициентов $B_{33}^{(3)}, B_{43}^{(3)}$ НКА №743 для «бестеневых» сезонов

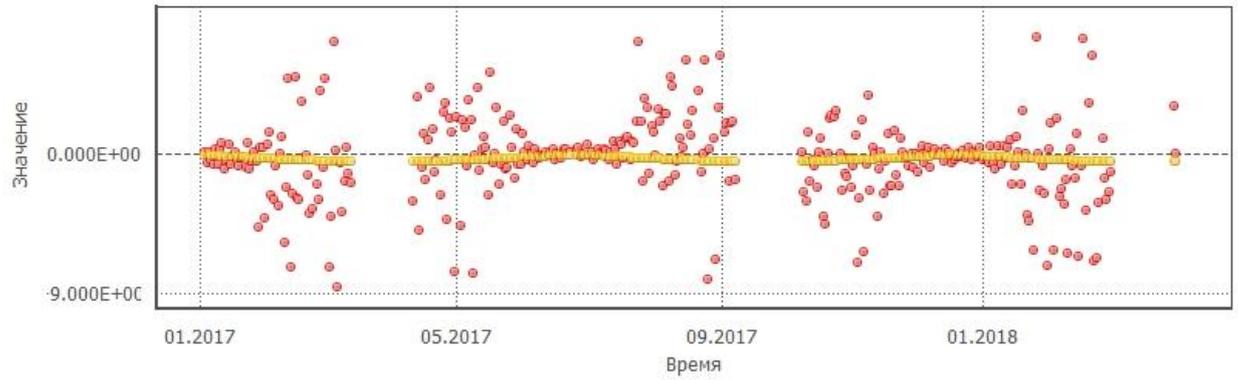


Рисунок А.81 – Реализации определения промежуточного коэффициента $D_4^{(3)}(\gamma)$ и построенная по ним модель с использованием уточненных коэффициентов $B_{44}^{(3)}$ НКА №743 для «бестеневых» сезонов