

УДК 629.7

МЕТОДЫ, СРЕДСТВА И ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ГЛОНАСС

© 2024 г. М. Н. Красильщиков¹, Д. М. Кружков^{1, *}, Е. А. Мартынов¹

¹МАИ (национальный исследовательский ун-т), Москва, Россия

*e-mail: kruzchkov@mail.ru

Поступила в редакцию 08.03.2024 г.

После доработки 11.03.2024 г.

Принята к публикации 13.05.2024 г.

Описывается задача совершенствования характеристик ГЛОНАСС в контексте современного конкурентного развития глобальных спутниковых навигационных систем. Авторы рассматривают в качестве ключевых направлений исследования и разработки, связанные, во-первых, с улучшением показателя signal-in-space ratio в оперативном режиме за счет создания новых технологических циклов на борту космического аппарата и привлечения в эти процессы бортовых аппаратных средств и, во-вторых, с формированием задела с последующей реализацией функциональных возможностей орбитальных группировок отечественной системы без загрузки эфемеридно-временной информации и частотно-временных поправок с наземного комплекса управления. Обсуждаются основные факторы, препятствующие реализации в текущий момент намеченных целей, а также предложены пути устранения или нивелирования влияния этих факторов путем разработки и внедрения специальных информационных технологий использования современных и перспективных бортовых аппаратных средств, размещаемых на борту навигационных космических аппаратов ГЛОНАСС и его потенциальных дополнениях.

Ключевые слова: ГЛОНАСС, SISRE, НКА, ПВЗ, эфемериды.

DOI: 10.31857/S0002338824030186 EDN: UPGJUO

METHODS, TOOLS AND INFORMATION TECHNOLOGIES FOR IMPROVING GLONASS CHARACTERISTICS

M. N. Krasilshchikov¹, D. M. Kruzchkov^{1, *}, E. A. Martynov¹

¹Moscow aviation institute (national research university)

*e-mail: kruzchkov@mail.ru

GLONASS characteristics improving task in the context of modern competitive development of global satellite navigation systems is considered. The authors consider research and development related, firstly, to improving the signal-in-space ratio indicator in an operational mode by creating new technological cycles on board the spacecraft and involving on-board hardware in these processes, and, secondly, with the formation of a reserve to orbital groupings functionality subsequent implementation without downloading ephemeris-temporal information and time-frequency corrections from the ground control complex. The article considers the main factors hindering the implementation of the currently set goals, and also suggests ways to eliminate or level the influence of these factors by developing and implementing special information technologies using modern and promising on-board hardware placed on board the GLONASS spacecraft and its potential additions.

Keywords: GLONASS, SISRE, NSC, EOP, ephemerides.

Введение. Современные глобальные спутниковые навигационные системы (ГНСС), включая ГЛОНАСС, GPS, Galileo, Beidou, как системы двойного назначения интегрированы в народное хозяйство (транспорт, системы жизнеобеспечения и т.д.), а также в современные образцы военной и специальной техники. Иными словами, сложившийся на сегодня уровень использования ГНСС свидетельствует о насущной востребованности их возможностей, предоставляемых любому потребителю. Одновременно с этим неуклонно растут и требования к качеству данных услуг с точки зрения потенциальных характеристик точности и в широком

смысле надежности решения задачи навигации. С развертыванием в XXI в. ГНСС нового, вслед за ГЛОНАСС и GPS, поколения таких систем конкуренция в этой области вышла на новый виток. Как следствие, разработчики и ответственные за поддержание и эксплуатацию ГЛОНАСС, GPS, Galileo, Beidou профильные организации постоянно решают одновременно ряд задач, включая модернизацию системы в целом, модификацию ее отдельных сегментов, совершенствование наземных и бортовых аппаратных средств, внедрение новых подходов и алгоритмов при решении рутинных задач и т.д. Проводимые мероприятия, в том числе исследования и разработки, направленные на улучшение характеристик ГНСС, приводят также и к одновременному усложнению процессов функционирования этих систем. В статье рассматривается одно из ключевых направлений совершенствования ГЛОНАСС, а именно: повышение точности навигации, в том числе «базовой», под которой авторы понимают точность навигации при использовании сигналов орбитальной группировки (ОГ) ГЛОНАСС без привлечения дополнительных средств и альтернативных источников высокоточной навигационной информации. Под ОГ ГЛОНАСС далее будем понимать не только средневысотный сегмент (СВС), но и перспективные его дополнения, такие как высокоорбитальный космический комплекс (ВКК), а также геостационарные и низкоорбитальные дополнения. Действующим общепринятым критерием оценки точностных характеристик ГНСС на текущий момент принято считать эквивалентную погрешность псевдодальности (ЭППД), обусловленную только космическим сегментом, или SISRE (signal-in-space range error) [1]. Несмотря на свое определение в скалярной форме, данный критерий агрегирует целый ряд свойств и характеристик навигационной системы, которые будут результатом ее штатного функционирования как интегрированной системы, включающей не только орбитальный сегмент в виде навигационных космических аппаратов (КА), но и ряд дополнений. В настоящее время уровень развития ГЛОНАСС таков, что к ухудшению SISRE прежде всего приводит рост ошибок эфемерид, оценок параметров вращения Земли и ухода часов спутника относительно системной шкалы, а также наличие различных неформулярных погрешностей в бортовой аппаратуре. Таким образом, стремление улучшить эксплуатируемую ГНСС требует разносторонней «работы» с целым рядом различных источников ошибок, которые выступают следствием влияния на навигационную систему неконтролируемых факторов различной физической природы. Для этого предполагается совершенствование технологических процедур штатного функционирования ГЛОНАСС, задачей которого является вовлечение современных и перспективных бортовых и наземных аппаратных средств с целью повышения точности эфемерид и формирования эфемеридно-временной и частотно-временных поправок на борту каждого навигационного КА (НКА) ОГ, которые бы обеспечивали наилучший показатель SISRE в оперативном режиме и сохранение его на приемлемом уровне в режиме автономного функционирования, а также более высокую точность передаваемых в навигационном кадре потребителю эфемерид и поправок к бортовым шкалам времени и в конечном итоге наилучшую точность формируемого на Земле навигационного решения. Кроме того, в силу двойного назначения отечественной навигационной системы, немаловажной ее характеристикой был и остается обеспечиваемый уровень точности навигации при функционировании космического сегмента ГЛОНАСС в автономном режиме, под которым понимается полное отсутствие загрузки готовых высокоточных данных с наземного комплекса управления (НКУ), и резервирование на борту НКА основных с точки зрения поддержания работоспособности ОГ, но выполняемых силами НКУ процессов.

Подводя итог сказанному, можно констатировать актуальность решения задач, направленных на улучшение характеристик ГЛОНАСС, а именно: достижение более высокого уровня точности прогнозирования и/или определения в процессе штатного и нештатного (т.е. без загрузки данных с наземного комплекса управления) функционирования НКА параметров — данных, влияющих на систему в целом. К числу таких параметров относятся:

- эфемериды НКА ГЛОНАСС в инерциальной системе координат на произвольно заданном отрезке времени;
- значения параметров вращения Земли (смещение полюса относительно его среднего положения на эпоху и неравномерность суточного вращения Земли) и их эволюция;
- уходы бортовых шкал времени относительно шкалы времени системы и относительно друг друга;

- значения выносов фазовых центров антенн во всех используемых частотных диапазонах (S, L);
- задержки в бортовой аппаратуре на различных частотах и по каждой литере.

1. Концепция и способы решения рассмотренных задач. Поставленную во Введении задачу предлагается решать поэтапно, декомпозируя ее на отдельные частные задачи, для решения каждой из которых необходимо формулировать индивидуальный подход, опирающийся как на разработку соответствующих методов и алгоритмов, так и на выбор средств и технологий, ориентированных на совершенствование той или иной характеристики системы. Использование такого подхода ожидаемо приведет к созданию новых технологических циклов, алгоритмов и результатов применения бортовых и наземных аппаратных средств на их основе. Сформулированную концепцию решения поставленной задачи совершенствования характеристик ГЛОНАСС удобно интерпретировать с помощью функциональной схемы, включающей последовательность определенных шагов (рис. 1). Данная схема отражает процесс совершенствования конкретных характеристик ГЛОНАСС на базе исследований и разработок, начиная с формирования «банка» располагаемых ресурсов и возможностей.

В вопросе оценки ресурсов для решения поставленной задачи авторами основное внимание уделяется действующим и перспективным образцам аппаратных средств, в первую очередь тем, которые в перспективе будут использованы в составе бортовых средств НКА существующей ОГ ГЛОНАСС и ее возможных дополнений: новые бортовые часы на водородном стандарте, беззапросная аппаратура межспутниковых измерений (БАМИ), БАМИ нового поколения (БАМИ НП), Межспутниковая лазерная навигационно-связная система (МЛНСС), МЛНСС нового поколения (МЛНСС НП), бортовые беззапросные квантово-оптические системы (ББКОС), наземные станции контроля и управления (НСКУ) и пр. Кроме этого, новые возможности, по мнению авторов, могут возникнуть в результате привлечения альтернативных систем и средств, не входящих в структуру ГЛОНАСС, а именно наземных квантово-оптических систем и радиоинтерферометров со сверхдлинной базой (РСДБ). Заметим, что все перечисленные выше средства используют информационные технологии, не реализованные на данный момент в штатных технологических циклах ГЛОНАСС. Как уже говорилось выше, каждое из перечисленных средств и сопутствующая его применению технология должны быть направлены на совершенствование конкретной характеристики (или нескольких характеристик) системы, т.е. в конечном итоге эффективность предлагаемой концепции будет определяться достигнутым целевым уровнем результатов. На рис. 1 эти уровни символически обозначены X и Y ; при этом X – уровень соответствующей характеристики в оперативном режиме функционирования, а Y – в режиме без поддержки НКА средствами НКУ. Иными словами, на этой функциональной схеме приведен перечень характеристик ГЛОНАСС, подлежащих улучшению, а также подчеркивается необходимость такого улучшения в оперативном и автономном (т.е. без поддержки НКУ) режимах. Рассмотрим далее ключевые особенности подхода к достижению нового уровня характеристик.

2. Ошибки эфемерид НКА. В результате использования разрабатываемой авторами информационной технологии предполагается совершенствование процедур штатного и формирование процедур нештатного функционирования орбитальной группировки ГЛОНАСС, следствием чего будет снижение погрешности вычисляемых на борту эфемерид. Такой результат может быть достигнут за счет усовершенствования соответствующего программного обеспечения и привлечения располагаемых ГЛОНАСС бортовых аппаратных средств межспутниковых измерений, применяемых в интересах повышения точности эфемерид НКА в отсутствие готовых пакетов данных. При этом предлагается совмещение технологий высокоточного прогнозирования и уточнения эфемерид на борту НКА в рамках единой технологической цепочки, где для уточнения эфемерид используются современные и перспективные аппаратные средства радиотехнических и оптических межспутниковых измерений, имеющие низкое значение среднеквадратического отклонения (СКО) шума измерений. Заметим, что при подобном подходе существует ряд технических проблем, устранение которых потребует дополнительных мероприятий, в частности обработки межспутниковых измерений между НКА ГЛОНАСС средневысотного сегмента и перспективных дополнениях системы, устранения сопутствующей

РИСУНКИ

Функциональная диаграмма совершенствования ГЛОНАСС

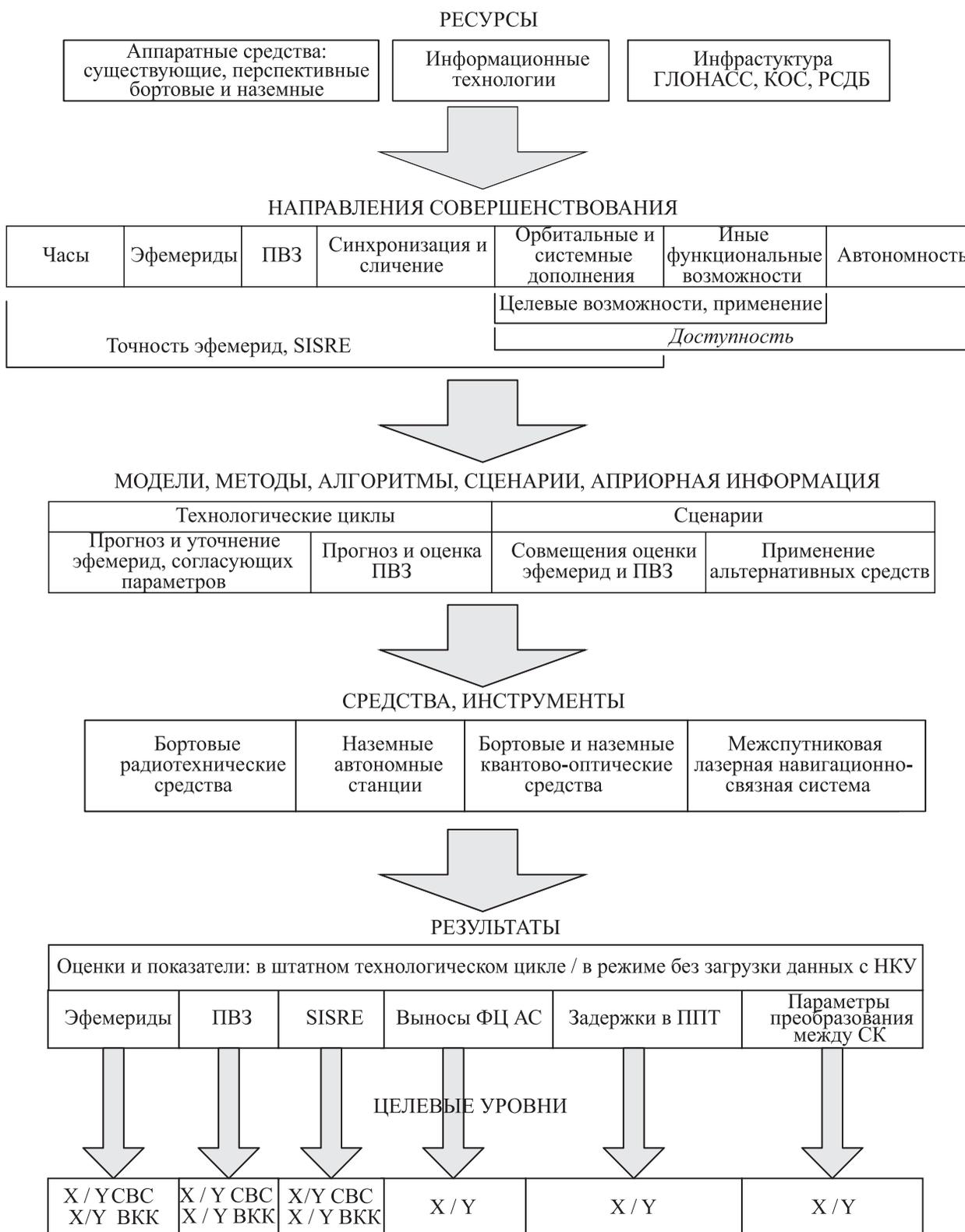


Рис. 1. Функциональная схема процессов совершенствования характеристик ГЛОНАСС.

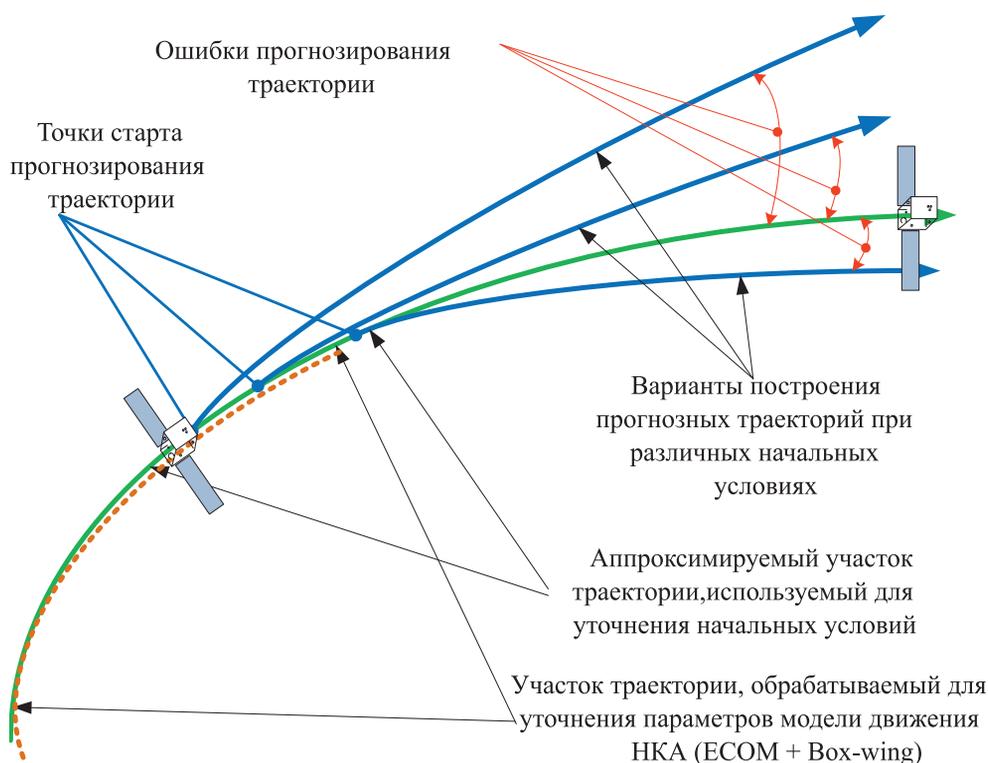


Рис. 2. Условная схема организации нового технологического цикла на борту НКА ГЛОНАСС.

Таблица 1. Модели, используемые для расчета возмущающих ускорений

Модель	Тип модели / Вариант реализации	Оптимизация под бортовой алгоритм
Геопотенциал Земли	В сферических функциях, коэффициенты EGM2008	Ограничение на количество гармоник в соответствии с высотой орбиты НКА, для средневысотного сегмента это составляет 12 членов симметричного поля, для высокоорбитальных дополнений – 6
Приливы в твердом теле	Включены, реализация согласно IERS conv.2010	–
Океанические приливы	Не учитываются	
Притяжение третьих тел	Модель центрального поля, учитываются Луна и Солнце. Эфемериды Луны и Солнца импортируются из каталога de421	Усеченная версия небесного каталога, содержащая данные только на полгода вперед. Периодичность их обновления вполне может быть не чаще раза в месяц
Солнечное давление	Классическая модель давления солнечного света	Уточнение модели box-wing + ecom
Альбедо	Классическая модель с разбиением на 30 поверхностей	Box-wing
Релятивистские эффекты	Не учитываются	

ших технических и технологических проблем. С учетом необходимости такой доработки предлагается реализовать технологический цикл функционирования ОГ в рамках двухэтапной процедуры. На первом этапе формируется высокоточный прогноз, алгоритм которого представляет самостоятельный результат работы авторов, а результаты прогноза используются на втором этапе для обработки измерений дальностей между НКА с учетом необходимых ограничений. Особенности моделей, применяемых для прогнозирования, приведены в табл. 1 [2].

Повышение точности прогнозирования достигается путем аппроксимации апостериорной траектории с помощью метода наименьших квадратов и оценки начальных условий движения и коэффициентов модели учета солнечного давления (рис. 2) [3]. Типовые результаты эволю-

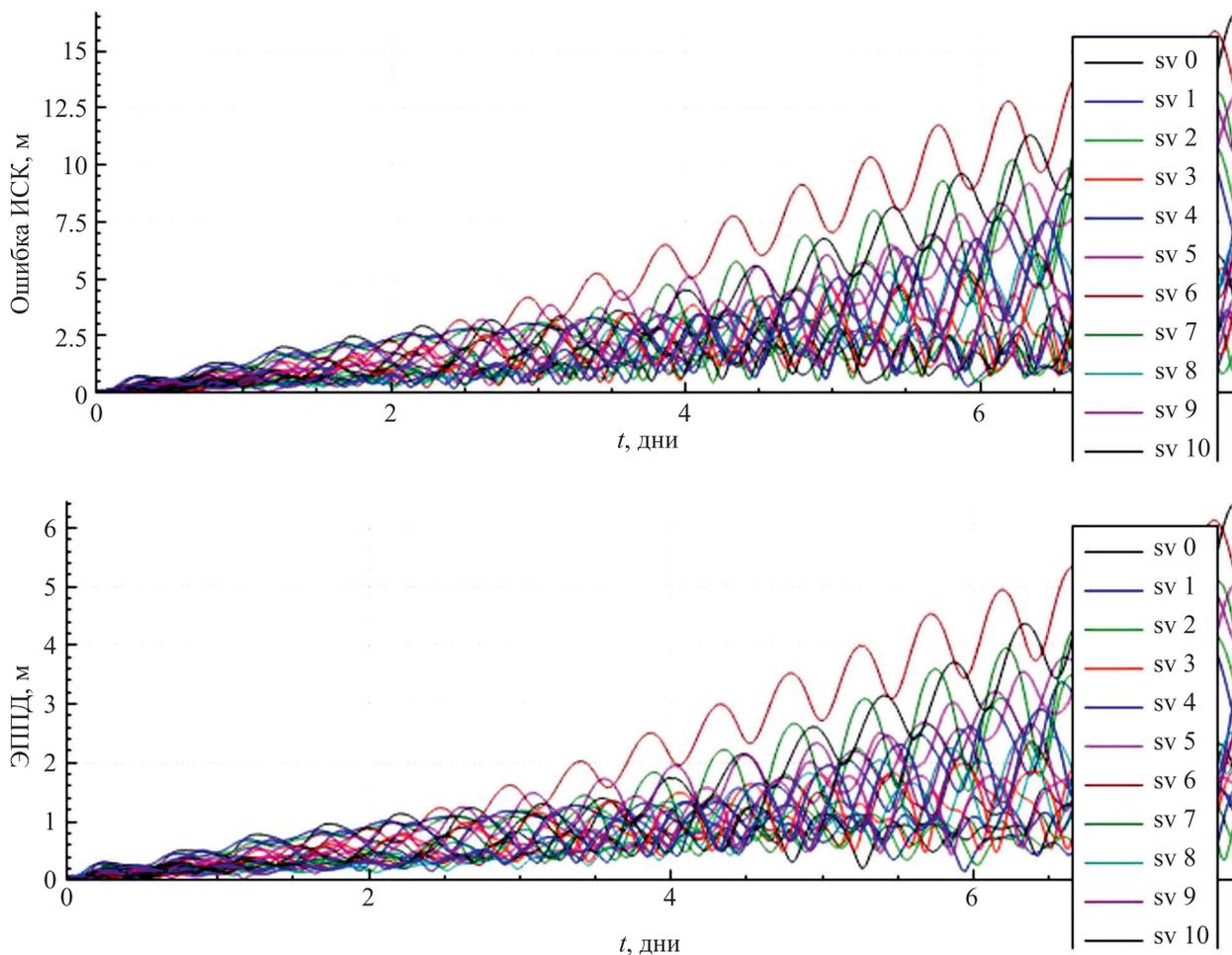


Рис. 3. Ошибки прогнозирования координат НКА ГЛОНАСС.

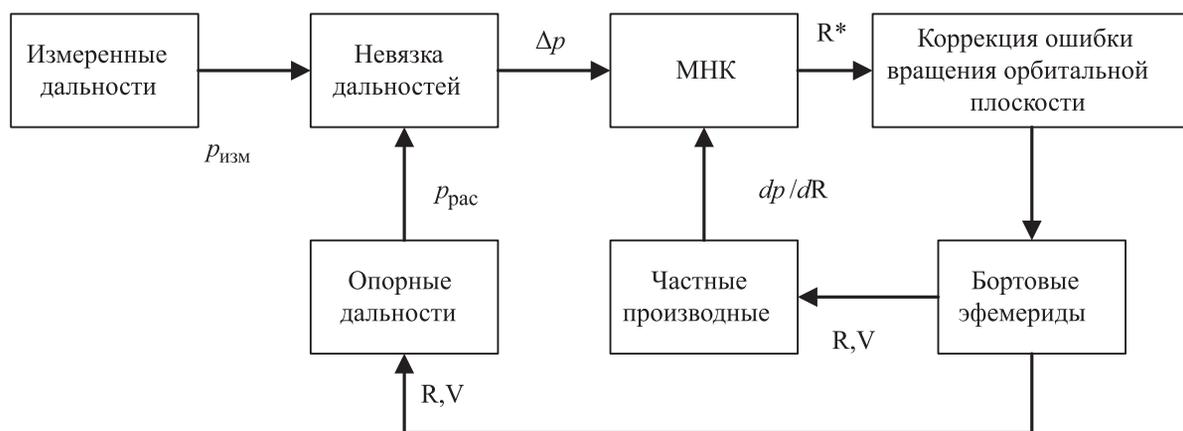


Рис. 4. Функциональная схема процесса уточнения эфемерид.

ции погрешности прогнозирования представлены на рис. 3 (здесь и далее sv – номер НКА в созвездии ОГ).

Процедура дальнейшего уточнения эфемерид НКА основана на использовании межспутниковых измерений. Результаты измерений и соответствующая эфемеридно-временная информация транслируются между НКА для обработки с применением метода наименьших квадратов [4, 5], обрабатывающего невязки Δp между фактическими измерениями дальностей $p_{\text{изм}}$ и их расчетными аналогами $p_{\text{рас}}$. Функциональная схема процедуры уточнения эфемерид приведена на рис. 4, типовые результаты по эволюции погрешности уточняемых эфемерид

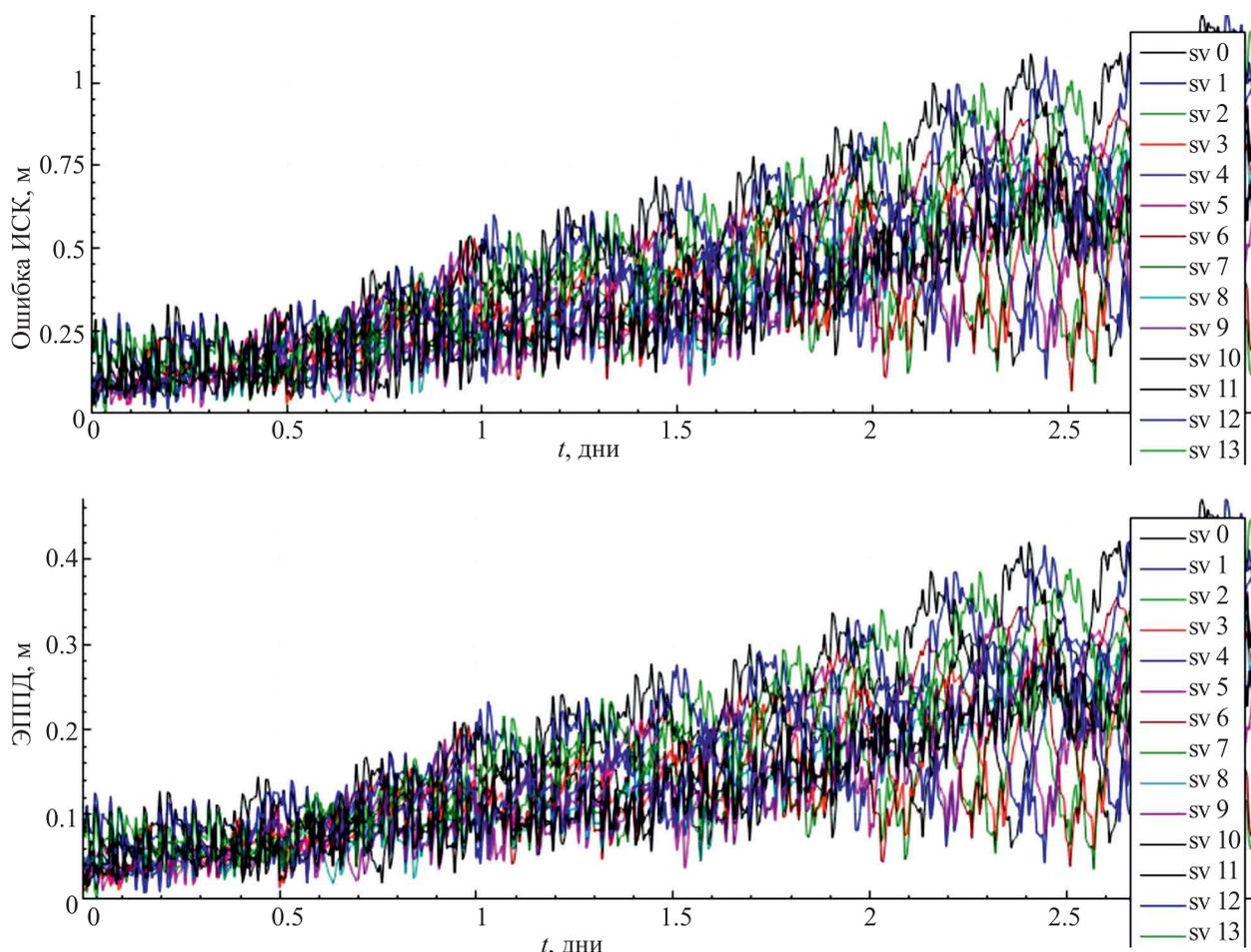


Рис. 5. Эволюция погрешностей определения эфемерид (абсолютная ошибка, сверху) и соответствующая им ЭПД (снизу).

НКА в режиме без загрузки ЭВИ – на рис. 5. Более подробно о данной технологии рассказывается в работе [6].

3. Проблема неопределенной эволюции параметров вращения Земли (ПВЗ). Рассмотрим теперь проблему неопределенной эволюции ПВЗ и влияние этой неопределенности на точность передаваемых потребителю эфемерид, итоговое значение ЭПД, а также точность прогнозирования эфемерид НКА при моделировании его движения в инерциальной системе координат. Современные и перспективные способы определения данных параметров имеют недостатки с точки зрения оперативности и точности предоставления этих данных в ГЛОНАСС от других системных служб, а от ГЛОНАСС – через переводимые в ПЗ90 эфемериды – к потребителю. Заметим, что используемый в сегодняшней технологической цепочке эксплуатации НКА ГЛОНАСС механизм регулярной загрузки данных о фактической эволюции ПВЗ и их прогнозе на будущие интервалы не только требует выделения на решение данной задачи значительных ресурсов, но и частого повторения этих процедур вследствие значительной скорости и непредсказуемости эволюции, в первую очередь dUT, препятствуя при этом функционированию НКА в независимом от данных с НКУ режиме. С целью преодоления этой трудности предлагается развиваемая авторами концепция совершенствования процедуры штатного и формирования процедуры нештатного функционирования ОГ ГЛОНАСС. Эта концепция включает создание самостоятельного набора алгоритмов, обеспечивающих повышение точности эфемерид на борту НКА в связанной с Землей системой координат за счет модернизации программных средств, привлечения располагаемых ГЛОНАСС бортовых аппаратных средств и сети специальных наземных станций. В итоге развиваемая концепция предполагает реализацию технологии высокоточного прогнозирования и уточнения парамет-

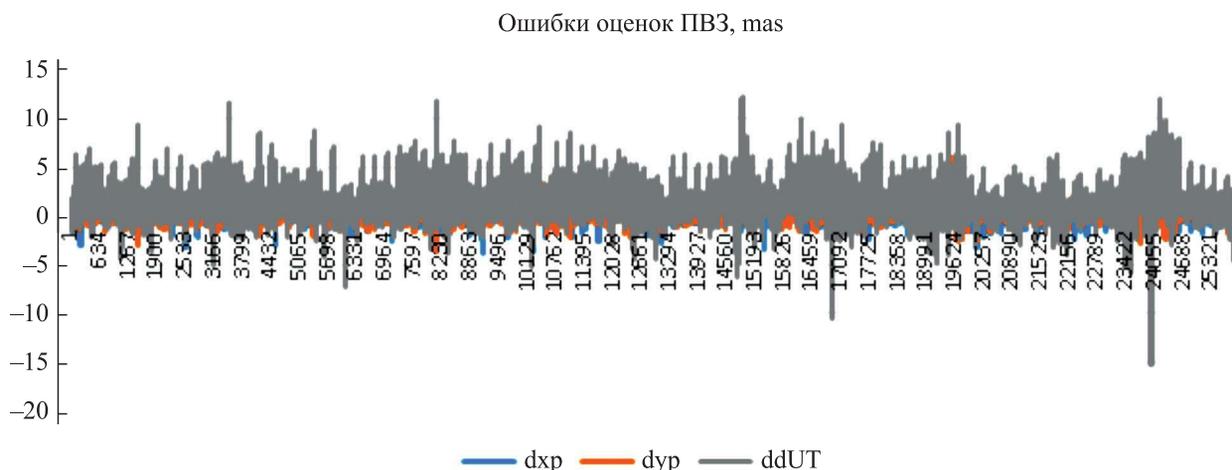


Рис. 6. Ошибки оценок ПВЗ, формируемые с помощью предлагаемой процедуры на интервале 90 дней.

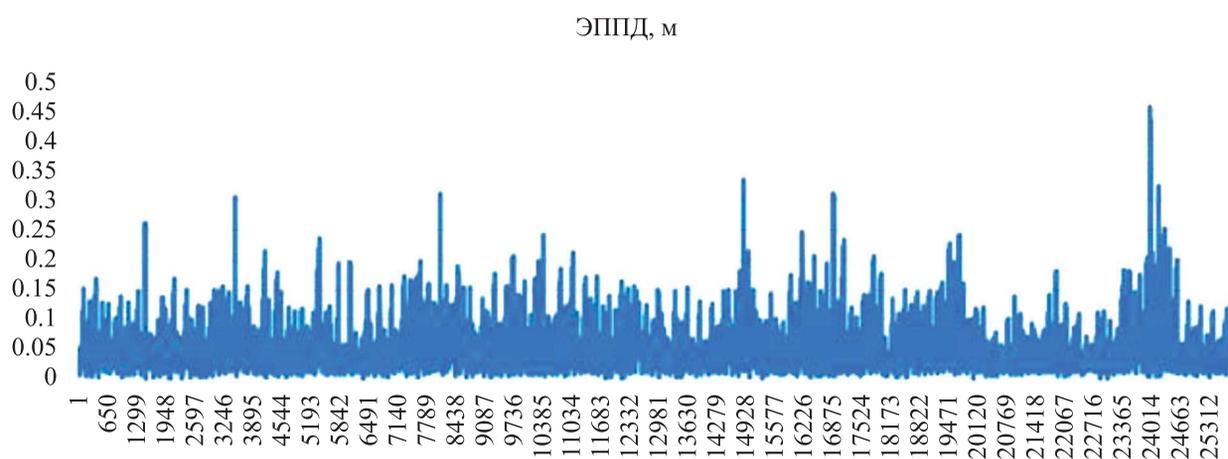


Рис. 7. Соответствующая ошибкам оценок ПВЗ эволюция ЭППД, м.

Таблица 2. Погрешности прогнозирования ПВЗ

Тип модели	Параметр	Ошибки прогнозирования (mas для x_p и y_p , ms для dUT) по уровню 0.95 для различных дней прогноза			
		20	30	60	90
ГЛОНАСС	x_p	26 (~520)	34 (~520)	54 (770–840)	63 (770–800)
	y_p	17 (490–510)	23 (490–500)	48 (480–520)	70 (730)
	dUT	12 (320–350)	15 (320–340)	27.5 (310–320)	40 (300–320)
NGA	x_p	31.5 (~590)	38 (~610)	51.5 (~710. 750–770. 810–850)	61.5 (~760)
	y_p	22 (490–500)	30 (470–510)	51 (620–660)	65 (690)
	dUT	12 (310–340)	15 (310–340)	27.5 (310–320)	40 (300–320)

ров вращения Земли на борту НКА. При этом прогнозирование осуществляется на основе использования нескольких моделей аппроксимации эволюции ПВЗ, среди которых выбирается лучшая по результатам многолетних наблюдений. Кроме того, авторами применена процедура оптимизации, обеспечивающая подбор интервала аппроксимации МНК по выбранной модели исходя из требуемых условий прогнозирования. Все это позволило получить точность прогнозирования, приведенную в табл. 2 [7].

В ячейках таблицы рядом с вычисленным результатом – ошибкой прогнозирования по уровню вероятности 0.95 в скобках приведены оптимальные в смысле достигаемой точности длины интервалов аппроксимации.

Процедуры уточнения ПВЗ на борту НКА базируются на применении аппаратуры для формирования беззапросных и запросных измерений дальностей до наземных станций. В осно-

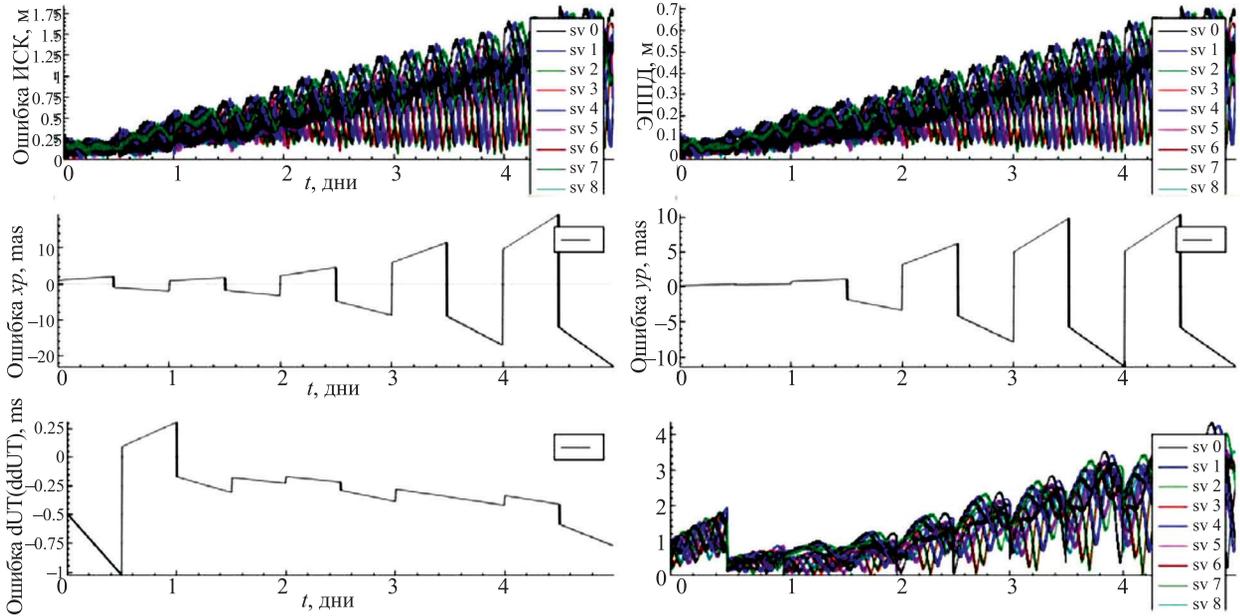


Рис. 8. Ошибки эфемерид, соответствующая им ЭПД и ошибки ПВЗ, получаемые в рамках реализации единого процесса планирования, формирования и обработки измерений на борту НКА.

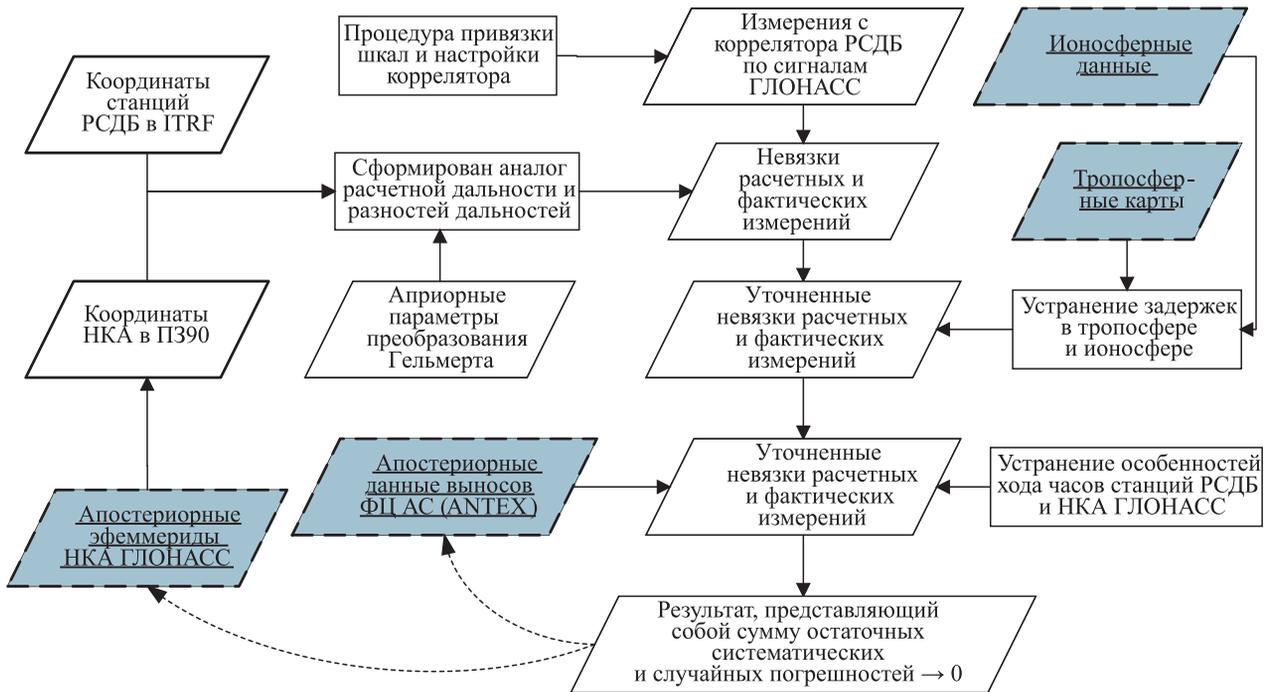


Рис. 9. Функциональная схема применения альтернативных технических средств и систем в интересах совершенствования ГЛОНАСС.

ве процедуры лежит использование уравнения для дальности, которое дифференцируется по компонентам ПВЗ [8, 9]:

$$\rho_{k,l}^{i,j} = f(\mathbf{X}_{н.с}^{j ITRF}(t_l), \mathbf{X}_{НКА}^{j GCRS}(t_k)),$$

где $\mathbf{X}_{НКА}^{j GCRS}(t_k)$ – координаты j -го НКА в инерциальной системе координат (СК) GCRS в момент t_k получения сигнала БАМИ, $\mathbf{X}_{н.с}^{j ITRF}(t_l)$ – координаты i -й наземной станции в земной СК ITRF в момент t_l отправки сигнала. Вид итоговых частных производных и другие подроб-



Рис. 10. Погрешность сличения опорных и фактических измерений разностей дальностей между станциями РСДБ и НКА.

ности в части реализации процедуры с применением метода наименьших квадратов можно найти в [9]. Типовые зависимости формируемых с использованием обсуждаемых алгоритмов результаты представлены на рис. 6, 7.

4. Совмещение задач уточнения эфемерид и ПВЗ на борту НКА ГЛОНАСС. Рассмотрим проблему совмещения процедур прогнозирования и уточнения эфемерид НКА в инерциальном пространстве с процедурой прогнозирования и уточнения ПВЗ в интересах, во-первых, повышения точности транслируемых эфемерид и снижения величины SISRE ГЛОНАСС в штатном режиме и, во-вторых, реализации режима функционирования современных и перспективных ОГ ГЛОНАСС без загрузки данных с наземного комплекса управления. Предлагаемая процедура включает два независимых параллельно выполняемых технологических цикла. В первом происходит регулярное решение задач по формированию высокоточных эфемерид в соответствии с методикой, упомянутой в разд. 2. Во втором цикле применяются прогнозные значения эфемерид, подвергаемые периодической (между итерациями обработки измерений до наземных станций и формированием оценок ПВЗ) инициализации результатами первого цикла. В результате уточняются компоненты расширенного вектора состояния, включающего, помимо ПВЗ, погрешности знания эфемерид в орбитальной системе координат, представленные аппроксимирующей их моделью в виде гармонического выражения, которое позволяет преодолеть ненаблюдаемость ПВЗ и эфемерид НКА при одновременной оценке. Эффективность предлагаемой концепции совмещения процедур прогнозирования и уточнения эфемерид НКА с точки зрения достигаемых характеристик точности продемонстрирована путем обработки измерений в совмещенном на борту процессе функционирования обоих технологических циклов, отработанном с использованием имитационного программно-математического комплекса, в котором применены реальные данные измерений, эфемерид и ПВЗ. Таким образом, показано, что итеративная задача одновременного уточнения эфемерид и ПВЗ имеет решение и обеспечивает высокоточные оценки как эфемерид в инерциальной СК, так и ПВЗ, т.е. позволяет таким образом снизить SISRE в условиях долговременного отсутствия закладок соответствующей информации с НКУ. Типовые результаты эволюции ошибок эфемерид и ПВЗ при одновременной оценке представлены на рис. 8.

5. Компенсация влияния прочих неконтролируемых факторов. Рассмотрим решение проблем, осложняющих реализацию описанных выше методик и алгоритмов. Речь идет о совокупности неконтролируемых факторов, влияющих на обработку различных типов измерений дальностей между НКА и НКА, а также между НКА и наземными станциями. В качестве основных факторов, вносящих систематические погрешности в измерения и тем самым препятствующих получению потребной точности оценок, генерируемых с помощью различных численных методов, рассмотрены:

- задержки в приемно-передающих трактах (ППТ) аппаратуры при передаче сигналов в разных диапазонах;
- погрешности определения выносов фазовых центров антенных систем (ФЦ АС);
- погрешности совмещения различных систем координат, которые могут применяться в ГНСС и других связанных с ними системах.

Решение обсуждаемой здесь задачи компенсации влияния перечисленных факторов на характеристики ГЛОНАСС опирается на дополнительные технические средства оснащения станций и НКА, осуществляющих взаимодействие друг с другом. Поскольку в текущий момент нет общепринятых методик и средств, используемых для определения задержек в ППТ и выносов ФЦ АС с высокой точностью, и не реализовано штатных технологических циклов по применению различных аппаратных средств в данных целях, авторами самостоятельно проделан выбор необходимых методов и средств, а также разработка методики оценки упомянутых погрешностей с их использованием. Предложена рекуррентная схема поэтапного уточнения выносов ФЦ АС и задержек в ППТ на основе обработки измерений фактических значений дальностей до станций и между НКА с привлечением высокоточной апостериорной эфемеридно-временной информации (ЭВИ) и частотно-временных поправок (ЧВП) и последующим применением полученных оценок обсуждаемых параметров во всех других технологических циклах функционирования ОГ ГЛОНАСС, описанных в разд. 2–4. В качестве дополнительного варианта решения поставленной в данном разделе задачи рассмотрено привлечение дополнительной инфраструктуры альтернативных средств и систем. Речь идет о более широком привлечении наземных и бортовых квантово-оптических систем (КОС) и отечественных РСДБ. Суть предлагаемого подхода состоит в разработке и реализации методики проведения и обработки измерений дальностей между НКА и наземными станциями КОС и РСДБ в интересах оценки следующих параметров: выносов ФЦ АС, уходов и флуктуаций бортовых шкал времени НКА, задержки приема и передачи сигналов в бортовых радиотехнических трактах относительно бортовых синхронизирующих устройств (БСУ) и относительно КОС, рассогласования системы координат ГЛОНАСС и других связанных с Землей систем координат. Такая обработка выполняется на основе использования функциональной схемы, приведенной на рис. 9. Отработка предлагаемой схемы с помощью программно-математического обеспечения и данных реальных измерений, апостериорных эфемерид и другой необходимой информации (выносы ФЦ АС из файлов ANTEX, ионосферные и тропосферные карты, координаты станций в земной связанной системе координат ITRF и пр.) позволила получить субсантиметровую точность сличения данных (рис. 10), что обеспечивает решение обратной задачи по оценке выносов и задержек с сохранением погрешности на таком же уровне.

Заключение. Описан развитый авторами подход к решению задачи совершенствования характеристик ГЛОНАСС, основанный на применении различных информационных технологий, аппаратных средств и новых технологических циклов функционирования ОГ НКА. Подход включает взаимосвязанные этапы, каждый из которых посвящен совершенствованию какой-либо характеристике системы, имеет свою оригинальную концепцию и реализуется с использованием соответствующих методов и алгоритмов. Отработка развиваемого подхода с целью его дальнейшей реализации и анализ эффективности решения поставленных задач осуществлялись с помощью специального программного макета. Получены предварительные результаты экспериментов, определяющие возможность достижения показателей точности и доступности на уровне, обеспечивающем ГЛОНАСС лидирующую позицию среди конкурентных ГНСС. Под этим понимаются следующие характеристики: по показателю SISRE менее 1 м в оперативном режиме ОГ, менее 1.5 м в течение месячного функционирования без загрузки данных с НКУ, менее 1 м по ошибкам эфемерид в аналогичном режиме, ошибки единицы mas в определении ПВЗ по уровню 0.95, сантиметровые ошибки выносов ФЦ и эквивалентов задержек приема и передачи сигналов в бортовых трактах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. GLONASS Information Analytics Center. <https://glonass-iac.ru/>, 10.12.2023.
2. *Kruzhkov D.M., Pasyukov V.V.* High-Accuracy Navigation Based on Informational GNSS Technologies. II GLONASS – Information Technologies and Navigation Tasks Solving Algorithms. M.: Moscow Aviation Institute, 2021.

3. *Bingbing D., Hugentobler U., Hofacker M., Selmke I.* Improving Solar Radiation Pressure Modeling For GLONASS Satellites // *J. Geodesy*. 2020. V. 94. № 8. P. 1–14.
4. *Grechkoseev A.K.* Study of Observability of Motion of an Orbital Group of Navigation Space System Using Intersatellite Range Measurements. I // *Computer and Systems Sciences International*. 2011. V. 50. № 2. P. 293–308.
5. *Grechkoseev A.K.* Study of Observability of Motion of an Orbital Group of Navigation Space System Using Intersatellite Range Measurements. II // *Computer and Systems Sciences International*. 2011. V. 50. № 3. P. 472–482.
6. *Krasilshchikov M.N., Kruzhkov D.M., M.N., Pasyukov V.V.* On The Implementation of Information Technology for Refining the Ephemerides of GLONASS Spacecraft Based on the Use of Advanced Intersatellite Measurement Hardware // *J. Computer and Systems Sciences International*. 2023. №5. P. 147–159
7. *Krasil'shchikov M.N., Kruzhkov D.M., Martynov E.A.* Predicting the Parameters of the Orientation of the Earth in Problems of Navigation Taking into Account the Phenomenon of the Development of Irregularity in the Earth's Rotation // *Cosmic Research*. 2023. V. 61. № 4. P. 324–332.
8. *Grechkoseev A.K., Krasil'shchikov M. N., Kruzhkov D.M., Mararescul T.A.* Refining the Earth Orientation Parameters Onboard Spacecraft Concept and Information Technologies // *J. Computer and Systems Sciences International*. 2020. V. 59. № 4. P. 598–608.
9. *Krasil'shchikov M.N., Kruzhkov D.M.* On the Issue of Autonomous Refining of the Earth Orientation Parameters Onboard Spacecraft. Analysis of the Possibilities of Developed Information Technology // *Cosmic Research*. 2021. V. 59. № 5. P. 357–365.