

# **Концепция разработки программно-методического обеспечения комплекса имитационного моделирования условий функционирования орбитального сегмента глобальных навигационных и телекоммуникационных геостационарных спутниковых систем**

© Л.Н. Лысенко, В.В. Корянов, А.Г. Топорков

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

*Изложена концепция создания информационно-вычислительного комплекса имитационного моделирования в форме адекватного цифрового аналога пространственно-временной области баллистико-навигационного обеспечения функционирования орбитального сегмента спутниковых систем совместно с «дополнениями» и сопутствующими динамическими процессами, входящими в сферу интересов потребителей спутниковой навигационной информации.*

**Ключевые слова:** имитационное моделирование, баллистико-навигационное обеспечение, фундаментальное координатно-временное обеспечение, спутниковые системы, ГЛОНАСС.

**1. Исходные предпосылки.** Появление ГЛОНАСС предопределило возможность модернизации старых и создание новых функциональных целевых потребительских систем (ПС) координатно-временного и навигационного обеспечения (КВНО) на базе перспективных и высокоэффективных навигационных технологий.

В свете текущего этапа развития глобальных навигационных спутниковых систем (НСС), ориентированного на точность навигационных определений до 0,1...0,6 м, существенно превышающую соответствующую характеристику действующей системы, актуальным представляется решение задачи учета уровня неопределенности знания параметров фундаментального координатно-временного обеспечения (ФКВО) при разработке моделей баллистико-навигационного обеспечения (БНО) перспективных космических систем, а также поиска возможных альтернатив повышения точности этих параметров сверх практически достижимых значений.

Перечень составляющих, включающих аппаратурные средства, их носители, в первую очередь искусственные спутники Земли (ИСЗ), программно-алгоритмические системное и специальное обеспечения, базы и банки данных, реализуемые математические модели, системы приема, передачи и визуального отображения информации и др. виды обеспечений, образующие в совокупности методическое и инструментальное оснащение ПС КВНО, обычно принято рассматривать в качестве составных элементов функционально целевых (координатно-временных и навигационных) потребительских систем (ФЦПС).

К числу основных (по назначению) ПС относят:

– системы потребителей специального назначения (Минобороны, МВД, МЧС, ФСБ и др. силовых структур);

– системы гражданских потребителей государственного значения, применение которых связано с обеспечением безопасности жизнедеятельности населения;

– системы потребителей хозяйственной сферы, навигационное обеспечение которых направлено на поддержание коммерческой и профессиональной деятельности отдельных трудовых коллективов и граждан.

Первые две группы потребителей представляют наиболее важный (по значимости) контингент пользователей ЕС КВНО. Применение средств КВНО в них осуществляется в интересах:

– автоматизированных систем управления вооруженными силами и средствами вооружения;

– систем управления всеми видами транспортных средств (воздушного, водного, наземного транспорта);

– автоматизированных систем контроля безопасности (в том числе систем поиска и спасения терпящих бедствие), а также повышения эффективности перевозок пассажиров и грузов;

– систем мониторинга результатов народнохозяйственной деятельности (сельского хозяйства, природопользования, кадастровых и строительных работ и др.);

– высокоточных систем проведения геодезических работ;

– сетевых систем связи и т. д.

Потребительские системы создаются, как правило, с учетом запросов конкретных пользователей по гарантированной точности решения стоящих перед ними навигационных задач и их эксплуатация осуществляется этими потребителями самостоятельно.

Содержание запросов по точности навигации конкретных ПС обычно находит отражение в Радионавигационных планах государств (см., например, «Радионавигационный план Российской Федерации 2010 г. (РРНП-2011)», утвержденный Приказом Минпромторга России от 31 августа 2011 г. № 1177, который представлен на сайте [www.internavigation.ru](http://www.internavigation.ru), а также Федеральный радионавигационный план США (ФРНП-2010) МТ и МО США, 2011).

Численные значения современных точностных характеристик, полученные на основе обобщения существующих запросов воздушных, морских и космических потребителей с учетом международных согласованных требований, приведены в табл. 1.

Из приведенных обобщенных требований практически по большинству ПС КВНО следует, что ни одна из систем, по крайней мере, на современном этапе не предполагает необходимости выхода на уровень значений средних квадратических отклонений (СКО) сантиметровых

точностей решения задач навигационных определений исключительно на основе радионавигационных спутниковых систем (РНСС) без применения возможных «навигационных дополнений».

В качестве исключения могут быть отмечены лишь предельные (максимальные) уровни точности погрешностей определения координат при заходе и посадке авиационных средств по категориям ИКАО.

Подчеркнем, что речь идет о предельных уровнях точности, к тому же по III категории ИКАО, которые в большинстве случаев не принято закладывать в проектные разработки.

Отдельного разговора заслуживают требования ПС геодезического обеспечения.

Сантиметровые точности государственной геодезической сети РФ (ГКИНП (ГНТА) 01-006-03. М., 2004) определены Законом № 209-ФЗ (с изменениями) от 26.12.1995, исполнение которого обязательно для всех субъектов геодезической и картографической деятельности.

Отметим, однако, что для решения прикладных задач геодезии измерения выполняются относительно пунктов опорной геодезической сети с использованием способов **относительных определений**. Государственная геодезическая сеть при этом базируется не только на спутниковой геодезической сети I класса (СГС-1), но и на фундаментальной астрономо-геодезической сети (ФАГС), а также высокоточной геодезической сети (ВГС). В данную систему к тому же вписаны давно существующие и широко используемые сети триангуляции и полигонометрии различных классов. Кроме того, за отсчетную поверхность, в частности в СК-95, принята не истинная поверхность Земли, а поверхность референц-эллипсоида Красовского.

В отношении приведенных значений требуемой точности навигационных определений в контексте обсуждаемой проблемы должны быть сделаны два важных замечания:

во-первых, приведенные значения характеризуют требования к навигационному обеспечению, другими словами, они должны относиться к характеристикам, получаемым в реальном времени;

во-вторых, рассматриваемые допустимые погрешности определяют уровень точности выходных значений характеристик аппаратуры потребителей навигационной информации (ПНИ), иначе они интегрально «впитывают» в себя все виды погрешностей информационного обеспечения ПС КВНО.

Для того, чтобы выделить составляющие ошибок, относящиеся только к информационному обеспечению собственно спутниковой системы (построению и обслуживанию ее орбитального сегмента), необходимо хотя бы укрупненно рассмотреть структуру информационного обеспечения системы КВНО в целом и оценить возможности ее декомпозиции.

Таблица 1

**Основные обобщенные требования потребителей  
к навигационному обеспечению**

Потребители	Решаемые задачи	Рабочая зона	Погрешность навигационного определения/высота (СКО)	Доступность	Целостность
Воздушные	Полет по маршруту	Глобальная	1,85 км/30 м	0,99–0,99999	15 с
	Полет в зоне аэродрома	Район аэродрома	370 м/30 м	0,99999	15 с
	Некатегоризированный заход на посадку	То же	16/8 м/6,0...4,0 м	0,99999	10 с
	Заход и посадка по категориям ИКАО	Зона средств посадки	6,0...4,0 м/3,0...2,0 м, (0,3...1 м)	0,9999999	6 с
Морские	Полеты для решения спецзадач	Локальная	1...10 м/2,0...1,0 м	0,999	1 с
	Плавание в открытом море (океане)	Морские акватории	Не более 100 м	0,99	0,99
	Плавание в прибрежной зоне	Прибрежные воды	Не более 10 м	0,99–0,997	0,99
	Прохождение проливов, заходы в порты (гавани)	Подходы к портам	8...10 м	0,997	0,99
	Маневрирование в портах	Акватории портов	3...8 м	0,999	0,99
Речные	Исследовательские суда морских ресурсов	Глобальная	От 1 до 10 м	0,997	0,99
	Движение судов по внутренним водным путям	Районы рек	От 2,5 до 5 м	0,999	0,99
		Районы каналов	От 1 до 2,5 м	0,999	0,99
	Расстановка знаков на реках и каналах	От 0,25 до 3,5 м	0,999	0,99	

Потребители	Решаемые задачи	Рабочая зона	Погрешность навигационного определения (СКО)	Доступность	Целостность
Космические	КА связи и ретрансляции	Глобальная	От 100 м до 200 м	0,95	0,99
	КА навигационного обеспечения	Глобальная	От 5 м вдоль орбиты, 3,3 м — по высоте	0,999	0,99
	КА геодезического обеспечения	Глобальная	До 0,33 м по всем координатам	0,999	0,99
	КА системы обнаружения терпящих бедствие объектов	Глобальная	33 м	0,95	0,99
	КА геофизического обеспечения	Глобальная	От 17 до 50 м	0,95	0,95

**2. Структура информационного обеспечения систем КВНО и критерии оценки эффективности глобальных навигационных спутниковых систем.** На достаточно грубом уровне приближения, впрочем достаточном для настоящего анализа, информационное обеспечение обобщенного КВНО, системообразующим элементом которого является РНСС, может быть подразделено на следующие составляющие:

– БНО орбитального сегмента РНСС и наземного комплекса управления (НКУ) этим сегментом;

– информационное оснащение радиотехнических (РТС) и иных вспомогательных систем (аппаратуры) бортового и наземного базирования РНСС, а также «навигационных дополнений»;

– программно-алгоритмическое обеспечение (ПАО) средств ПНИ.

Еще на начальной стадии проектирования системы «Ураган» (развитием которой является современная ГЛОНАСС) в конце 80-х гг. прошлого столетия была доказана возможность функционально-компонентной декомпозиции общей структуры системы на основе базовых представлений подсистем при их соединении с помощью прямых и обратных связей и с выделением различного уровня иерархии подсистем в зависимости от типа связей (главных и местных). Следствием выполненной декомпозиции явилось принятие гипотезы об инвариантности информационного обеспечения РТС и средств ПНИ по отношению к информационному обеспечению управляемой структуры РНСС. В свою очередь, это привело к построению вычислительных схем оценки погрешностей навигационных определений по схеме их декомпозиции на погрешности определения координат «идеальным приемником» и составляющие «вычислительной ошибки» функционирования РНСС.

Подобная схема неразрывно связана с используемыми основными характеристиками НСС, к которым принято [1, 13] относить:

– геометрические факторы (ГМФ), являющиеся характеристикой точности навигационных определений, показывающие, насколько конкретная конфигурация рабочего «созвездия» навигационных спутников, определяемая структурой ОГ, ухудшает точности определения навигационных параметров по сравнению с оптимальным «созвездием» одновременно наблюдаемых пользователем четырех спутников с вероятностью, близкой к единице (0,9999), причем наиболее значимым из числа возможных ГМФ является пространственный ГМФ (PDOP), используемый для пересчета эквивалентной погрешности псевдодальности (дальномерных беззапросных измерений пользователя до каждого спутника) в погрешности пространственных навигационных определений ПНИ;

– устойчивость структуры ОГ, определяющая стабильность состояния радионавигационного поля (РНП) системы и необходимого запаса рабочего тела спутника для поддержания ОГ в течение срока ее активного существования;

– доступность навигации — показатель, отражающий возможность потребителя на заданном временном интервале и в данном регионе воспользоваться РНП для навигации с заданной точностью, выражаемый через процент времени, в течение которого PDOP не превышает заданного значения для любой точки, в том числе и с высоким уровнем «затенения» зоны действия системы;

– непрерывность РНП — характеризует способность РНСС обеспечивать ПНИ без возникновения разрывов в поступлении информации, выражаемая в вероятности безотказной работы системы;

– целостность РНП — представляет собой показатель качества мониторинга состояния поля и способности своевременного оповещения потребителя о снижении уровня обслуживания.

Очевидно, что две последние характеристики определяют эксплуатационные возможности конкретной ПС КВНО и к БНО НСС прямого отношения не имеют. Три предшествующие характеристики в той или иной степени зависят от БНО, и именно они должны быть использованы при проведении анализа состояния и перспектив совершенствования существующих и вновь создаваемых глобальных и региональных спутниковых систем.

В табл. 2, в частности, приведены основные тактико-технические характеристики (ТТХ):

– Global Positioning System (GPS) США, первоначально разрабатываемая как система ВМФ США NAVSTAR;

– глобальной навигационной спутниковой системы (ГЛОНАСС) «Ураган»;

– глобальной навигационной спутниковой системы Galileo («Галилео», Европейский союз);

– навигационной спутниковой системы Compass (КНР), на интервале их функционирования в 2012 г. и прогнозного интервала доработок 2020 г. [13].

Таблица 2

### Основные тактико-технические характеристики ГЛОНАСС и зарубежных СНС

Характеристики РНСС	ГЛОНАСС 2012 г.	GPS 2012 г.	ГЛОНАСС 2020 г.	GPS-III, 2020 г.	Galileo, 2020 г.	Compass, 2020 г.
Количество КА в составе системы	24	24*	30	32	27...30	35
Доступность навигационного поля системы (на открытой местности), %	99,997	99,98	100	100	100	100

Характеристики РНСС	ГЛОНАСС 2012 г.	GPS 2012 г.	ГЛОНАСС 2020 г.	GPS-III, 2020 г.	Galileo, 2020 г.	Compass, 2020 г.
Составляющая вычислительной ошибки, м	1,4	0,6	0,3	0,35	< 0,5	< 0,5
Погрешность навигационного определения идеальным приемником, м	2,8	1,2	0,6	0,7	< 1,0	< 1,0
* Во всех официальных документах в качестве номинального состава ОГ указывается 24 ИСЗ, остальные считаются резервными.						

В этой таблице основное внимание должно быть обращено на прогнозируемую величину «составляющей вычислительной погрешности» ГЛОНАСС (2020). Эта величина соответствует значению сантиметрового уровня точности. Прежде чем перейти к обсуждению ее составляющих и возможности достижения такой точности в целом, предварительно необходимо остановиться на проблемах взаимосвязи БНО с ФКВО.

**3. Содержание основных задач БНО и их связь с ФКВО.** Баллистико-навигационное обеспечение космических полетов включает в себя [5, 8] следующие основные задачи:

- формирование требований, синтез и оптимизация параметров баллистической структуры орбитального сегмента спутниковой системы;
- определение по результатам прямых измерений векторов состояния спутников и/или эфемеридно-временной информации;
- прогнозирование результатов измерений на заданный момент времени;
- анализ вероятности выполнения целевых задач полета;
- расчет функций информационного обеспечения, необходимых для осуществления динамических и иных типов операций (зон видимости, светотеневой обстановки и т. д.);
- определение всех видов управляющих и корректирующих воздействий;
- построение и отображение пространственно-временной обстановки и др.

По своему содержанию эти задачи принято [5] подразделять на априорные задачи баллистического обеспечения (планирование полета, баллистическое проектирование системы и т. д.); задачи опера-



тивного навигационного обеспечения и задачи послеполетного анализа.

Блок точности БНО по своему входу связан в структурной схеме системы КВНО ПНИ с выходом блока ФКВО, охваченного в свою очередь главной обратной связью, идущей с выхода блока требуемой точности ПС КВНО. Подобная структура обсуждаемой части схемы очевидна, поскольку уровень точности и эффективности КВНО однозначно определяется уровнем развития ФКВО (бессмысленно ставить задачи повышения точности КВНО без их предварительного обеспечения на уровне ФКВО).

Соответственно, к числу главных задач ФКВО относятся:

- построение и поддержание высокоточной глобальной школы времени и эталонных частот;
- формирование небесной системы координат и ее реализация в виде каталога высокоточных координат источников различных диапазонов длин волн;
- формирование виртуальной земной базовой системы координат и ее материализация в формате каталога координат опорных измерительных и «закладочных» станций;
- создание адекватных моделей и расчет глобальных и локальных трехмерных движений точек земной коры с целью сверхточного определения положения центра масс (ЦМ) Земли;
- уточнение параметров Солнечной системы в виде сверхточных значений фундаментальных астрономических постоянных;
- определение параметров взаимной ориентации небесной (инерциальной) и земной систем координат через параметры вращения Земли;
- нахождение истинных значений параметров фигуры Земли и тел Солнечной системы, а также их гравитационных полей;
- построение моделей и высокоточная трансляция текущей информации о состоянии тропосферы и ионосферы Земли, состоянии солнечной активности и др.

Указанные в табл. 2 ТТХ перспективной ГЛОНАСС, согласно исследованиям головной организации в области ФКВО — Института прикладной астрономии (ИПА) РАН (Санкт-Петербург), эквивалентны требованиям к комплексу средств фундаментального обеспечения на уровне определения положения ЦМ Земли с погрешностью не более 1 см, земной системы координат —  $5 \times 10^{-10}$  (3 мм по координатам), а в части небесной системы координат — точность положения должна характеризоваться уровнем 0,02 мс дуги для стандарта ICRF и 0,1 мс для геодезических радиисточников [15, 16].

Чтобы были понятны условия практического выхода на уровень таких требований, отметим что они не достижимы без обеспечения суточного прогноза орбит спутников ГЛОНАСС с большей точностью чем 1 мм, определения эфемерид тел Солнечной системы на

уровне  $10^{-11}$  при суточной нестабильности стандартов частоты и времени — не хуже  $5 \cdot 10^{-17}$  с.

В отношении указанной точности прогноза возьмем на себя смелость утверждать, что она не может быть обеспечена в принципе. Что же касается остального, то здесь все определяется «ценой вопроса». Даже по самым грубым прикидкам она может оказаться соизмеримой со стоимостью реализации пилотируемого полета к Луне.

Означает ли это, что оговариваемые, в частности Федеральной целевой программой «Поддержание, развитие и использование системы ГЛОНАСС на 2012–2020 годы» (утвержденной постановлением Правительства РФ 03.03.2012. М.: Роскосмос, 2012), требования являются в принципе невыполнимыми? Отнюдь нет. Достижение любых требований всегда предполагает возможность поиска и применения альтернативных решений и средств, способных привести к заданной цели.

Для лучшего понимания существа данного тезиса ограничимся предварительно анализом проблем БНО геостационарных (ГС) ИСЗ. Сколь бы точно не определялись параметры ФКВО, абсолютной точности их знания добиться невозможно, а следовательно, практически невозможно и обеспечить выполнение условий абсолютной стационарности.

Очевидно, что имеющиеся неопределенности знания таких факторов, как нецентральность гравитационного поля Земли (ГПЗ), неточность знания силы притяжения Солнца, Луны, Венеры, Юпитера и других внутренних планет Солнечной системы, совокупного гравитационного воздействия 301 наиболее крупного астероида, прямого и отраженного светового давления, приливных деформаций Земли, океанских приливов, поправок общей теории относительности и др., неизбежно будут приводить к смещению (дрейфу) спутника относительно земной поверхности.

Несмотря на то что ускорения, испытываемые от, скажем, прямого светового давления (уровня  $10^{-7}$  м/с<sup>2</sup>), составляют на первый взгляд практически неосязаемые величины, через 30 суток вызванные ими максимальные отклонения от номинальной точки стояния составят примерно соответственно 2,4 км и 8,5 м.

Отсюда напрашиваются два возможных пути решения проблемы: либо пойти по пути повышения точности и достоверности знания параметров ФКВО (насколько это возможно) и технической реализации соответствующего прецизионного БНО, либо сознательно (с учетом реально достижимых возможностей существующих систем) ограничить допустимую точность БНО до уровня разрешенных отклонений, вызываемых дрейфом, с поддержанием параметров орбиты наиболее близко к идеальным стационарным значениям в районе заданной точки стояния посредством управления движением центра масс ГС ИСЗ, состоящего в периодическом проведении коррекции его орбиты.

У первых поколений выводимых на ГСО спутников корректировались, как правило, лишь параметры, определяющие смещение ИСЗ по долготе так, чтобы он гарантированно оставался в пределах геостационарного пояса («пояса Кларка»).

Повышение качества ФКВО позволило увеличить уровень точности БНО и главное — найти приемлемый компромисс по величине зоны нечувствительности допустимых отклонений спутника от номинала, определяющей величину энергетических затрат на коррекцию орбиты, с одной стороны, и, с другой — ограничений на минимально допустимые угловые расстояния между соседними спутниками на ГСО, устанавливаемые международными соглашениями, исходя из соображений электромагнитной совместимости спутниковых радиолиний (см., например, «Регламент радиосвязи»/ Edition of 2004. № 119-04-REV-04). Введенное этим регламентирующим документом ограничение в  $\pm 0,1^\circ$  в настоящее время доведено до значения  $\pm 0,05^\circ$  для значения допустимого отклонения спутника по долготе относительно номинального значения долготы точки стояния.

Заметим при этом, что достижение указанного уровня точности обеспечивается [9] всего лишь при учете следующих видов (из перечисленной выше совокупности) возмущений:

- составляющих ГПЗ с удержанием гармоник сферических функций геопотенциала не выше 8-го порядка (и это при том, что международная модель Земли EGM-96 имеет порядок и степень разложения геопотенциала по сферическим гармоническим функциям, равный 360, и содержит 130 317 коэффициентов, позиционируемых [11] как достоверные);

- гравитационного притяжения Солнца и Луны как точечных масс с ошибкой порядка 0,005 % (для Солнца) и 0,03 % (для Луны);

- прямого светового давления, являющегося наиболее неопределенным (с погрешностью на уровне 3 %);

- ошибок реализации вектора тяги корректирующей двигательной установки (модуля на уровне 10 % погрешности и предельной величины ошибки ориентации вектора тяги, не превосходящей  $2^\circ$ ).

Повышение и без того достаточно высокого уровня стабильности бортовой шкалы времени РНСС может отчасти быть достигнуто при использовании двухпараметрического бортового алгоритма решения частотно-временной задачи межспутниковых измерений (МСИ) расхождений шкал для «веерной» схемы по скользящему мерному интервалу при периодических коррекциях с использованием поправок от НКУ [6, 17].

Эффект достижения автономного уточнения частотно-временных поправок при использовании «веерной» схемы МСИ обеспечивается за счет формирования вторичных измерений расхождений бортовой шкалы времени по каждому сеансу МСИ с расчетом оперативных

добавок к опорным частотно-временным параметрам на основе усреднения шкал в пределах частной веерной подгруппы.

Эквивалентом снятия ограничений по недостижимой, как уже отмечалось выше, миллиметровой точности прогноза может служить уменьшение «интервала старения» эфимеридно-временной информации (ЭВИ), который в настоящее время в системе ГЛОНАСС для стандартного (штатного) периода функционирования составляет 12...14 ч. При этом, правда, следует учитывать, что обеспечение достаточно малой (во всяком случае, существенно меньшей существующей) величины интервала старения ЭВИ возможно только в случае, когда измерения сети командно-измерительных станций, по которым осуществляется уточнение эфемерид и ЧВП, не имеют перерывов, больших, чем требуемые интервалы старения, и чтобы топология и топография закладочных станций обеспечивали бы «закладки» с гарантированной точностью.

Существующая расширенная сеть отечественных беззапросных измерительных станций (БИС), включая антарктические, не обеспечивает непрерывного трехкратного покрытия орбит ГЛОНАСС. Для создания соответствующей глобальной сети, кроме Антарктиды, потребуется размещение БИС в Австралии, Новой Зеландии, Индонезии, на островах юга Тихого океана, Африке, Южной и Северной Америке.

Наконец, нельзя не сказать, хотя бы в двух словах, о проблемах разрывного РНП. Каких только вариантов технических решений не предлагалось, включая такие экзотические, как создание лунных интегрированных информационно-навигационных обеспечивающих систем трехплоскостного построения (15 спутников) с периодом порядка 37 с и наклоном  $58^\circ$  (ЦНИИмаш), а также баллистических структур навигационного назначения с элементами базирования в треугольных точках либрации системы «Земля–Луна» (ВКА им. А.Ф. Можайского и МГТУ им. Н.Э. Баумана). Можно предположить, пусть даже в очень отдаленной перспективе, что дело дойдет до анализа достоинств и недостатков и этих альтернативных проектов.

**4. Подходы к анализу альтернативных вариантов возможных достижений цели по совершенствованию спутниковых систем.** Сопоставительный анализ различных технических решений, направленных на достижение одной и той же цели, базируется сегодня на применении «метода экспертных оценок» с использованием неочевидных и плохо формализуемых критериев.

При всем уважении, испытываемом к существующему экспертному сообществу ведущих организаций ракетно-космической отрасли (РКО), все же полагаться на безошибочность и обоснованность выносимых ими «вердиктов» не приходится.

Очевидно, не может вызвать возражений тот факт (имеются в виду изложенные выше соображения), что выбор наиболее приемлемого

из возможных альтернатив решения обсуждаемых задач должен осуществляться как минимум по критерию «цена–качество», а еще лучше с применением специальных критериев векторного типа, характерных для Парето-оптимальных систем.

Подобный подход возможен лишь при наличии соответствующего «инструментария», отсутствующего сегодня в организациях космической отрасли. Более того, представляется очевидным, что при современном кадровом обеспечении ни одна отдельно взятая организация этой отрасли не сможет разработать такой «инструментарий»: для решения этой проблемы потребуется кооперация наиболее крупных специалистов организаций и предприятий различного ведомственного подчинения (Роскосмоса, Минобороны, Академии наук, организаций системы высшего профессионального образования).

Обоснование данного утверждения видится в том, что, с одной стороны, сложнейший характер связи ЭКВО, предполагающего наличие отсутствующей пока универсальной высокоточной теории гравитационного поля Земли и тел Солнечной системы с БНО, потребует участия в разработке «фундаментальных» теоретиков высокого уровня, а с другой стороны — даже постановка задачи и формулировка концепции создания обсуждаемого универсального комплекса невозможны без участия практикующих специалистов в области БНО.

Оценка учета уровня неопределенности знания ФКВО при формировании БНО перспективных высокоточных РНСС потребует создания специальных теоретических и методических разработок в области теории чувствительности (теории дифференциальной коррекции) параметров БНО по отношению к варьируемым уровням параметров ФКВО, выполнения инновационных исследований в области поиска возможных альтернатив повышения точности параметров БНО сверх практически достижимых, исходя из требований точности параметров ФКВО, выработки предложений по хотя бы ориентировочному составу и содержательному наполнению соответствующего комплекса.

Именно достижению этой цели, хотя и на концептуальном уровне, посвящена данная статья.

**5. Современное состояние вопроса и обзор предшествующих работ.** Было бы некорректным утверждать, что идея создания соответствующего «инструментария» никогда не обсуждалась ранее другими авторами. Более того, следует признать, что отдельные фрагментарные ее элементы уже получили практическое воплощение [2, 3, 6, 7, 10].

В частности, в качестве аналога фрагментов подобного типа разработок могут быть отмечены существующие комплексы, имеющиеся и широко используемые в наиболее крупных организациях космической отрасли (ЦНИИмаш, ОАО «Информационные спутниковые системы (ИСС) им. акад. М.Ф. Решетнева», ОАО «Российские космические системы» (РКС) и др.).

Так, с помощью одного из первых комплексов имитационного моделирования РНСС в середине 90-х гг. прошлого столетия удалось эффективно решить задачу демонстрации возможностей последовательного развертывания и использования спутниковой системы, изначально рассматриваемой в качестве региональной для европейской части Земного шара с последующим дооснащением и доведением ее до уровня глобальной сетевой системы [5].

В ходе моделирования РНСС оценивались точностные характеристики определения навигационных параметров потребителей, расположенных равномерно по градусной сетке с шагом  $10^\circ \times 10^\circ$ . Шаг имитации по времени составлял 1 мин на суточном интервале ее функционирования.

Конечным результатом моделирования явилась оптимизация баллистической структуры различных вариантов построения спутниковой системы, удовлетворяющей заданным ограничениям ( $PDOP < 5$  в течение 95 % времени суток в любой точке Земного шара при минимальном угле возвышения зоны наблюдения навигационного спутника над горизонтом, составляющем  $15^\circ$ ). Уровень неопределенности параметров ФКВО при этом не варьировался и принимался соответствующим уровню модели Параметров Земли ПЗ-90.

Близкой по целям и задачам работой, направленной на создание исследовательско-аналитического комплекса аналогичного назначения, можно считать цикл исследований, проводимых в Национальном центре космических исследований и технологий Республики Казахстан с привлечением к ее выполнению Института космической техники и технологии. Однако, судя по отдельным публикациям [4] ведущих сотрудников указанных организаций, результаты этих исследований пока еще находятся в зачаточном состоянии.

Из числа аналогов-разработок организаций дальнего зарубежья заслуживают внимания [1] комплексы имитационного моделирования Navigation Toolkit и Orbit Determination Toolkit (Analytical Graphics, Inc.), Free Flyer (A.I. Solutions).

Применяемые в ОАО «ИСС им. акад. М.Ф. Решетнева» схемы процессов имитационного моделирования ориентированы, прежде всего, на отработку комплекса «модель внешней среды — модель измерительных средств борта» и на выбор рациональных вариантов построения информационно-управляющих систем, а также реализуемых в них алгоритмов [3, 7, 10]. Математические модели «истинного» орбитального движения при этом принимаются, как правило, отвечающими уровню неопределенности параметров, соответствующему стандартам WGS-84 и IERS на момент проведения моделирования.

Наконец, многочисленные комплексы и стенды полунатурного моделирования РКС разрабатывались и нашли применение, главным образом, для отработки различных технологий управления РНСС при использовании достаточно широкой номенклатуры командно-изме-

рительных систем разработки ФГУП «РНИИ КП». Насколько известно авторам, проблемы баллистического обеспечения полета космических аппаратов (КА) при их создании либо не затрагивались вообще, либо носили вспомогательный характер [14].

Значительную роль при анализе и оценке эффективности различных вариантов построения межспутниковых линий (МСЛ) измерений и связи НСС с оценкой их тактико-технических характеристик (ТТХ) играет в настоящее время комплекс имитационного моделирования Информационно-аналитического центра (ИАЦ) КВНО ЦНИИмаш ИМПС-Л «Синхротрон» [6, 17] и др.

### **6. Формулировка цели разработки и назначения комплекса.**

Определение и формулировка предметной области и целевого назначения комплекса должны быть поставлены в соответствие с его назначением и перечнем задач, оговоренными хотя бы на концептуальном уровне.

Имея это в виду, определим основное целевое назначение обсуждаемого объекта как создание адекватного стохастического цифрового информационно-исследовательского аналога (образа) пространственно-временной области БНО функционирования орбитального сегмента систем ИСЗ (главным образом, глобальных навигационных и телекоммуникационных геостационарных систем), предназначенного для осуществления экспертных оценок, аттестации и сертификации результатов разработок, связанных с созданием перспективных спутниковых систем различного назначения. Стохастический характер информационного обеспечения комплекса однозначно определяет его класс как имитационного [12].

Подчеркнем, что в отличие от существующих средств и методов, реализуемых в Информационно-вычислительном комплексе Центра управления полетом (ИВК ЦУП) ЦНИИмаш, а также в Баллистическом центре наземного комплекса управления (БЦ НКУ), предназначенных, главным образом, для решения задач оперативного управления [18], целевое назначение предлагаемого комплекса предусматривает его применение на проектной стадии создания СС.

Разработка структуры и содержательного наполнения комплекса должна осуществляться исходя из возможностей задания и вариативных изменений в широких пределах следующих исходных данных:

- состава и численных значений параметров ФКВО, аттестованных под содержание конкретных задач БНО;
- состава, структуры, технических характеристик наземного автоматизированного комплекса управления (НКУ) и бортового комплекса управления (БКУ), вариантов реконфигурации их структуры при возможной деградации;
- вариантов взаимосвязи основных элементов и подсистемы БНО, в состав которых входят технические, программные, информационные средства отдельного командно-измерительного комплекса (ОКИК) и ЦУП;

– структуры, состава и параметров орбитальной группировки СС;  
– значений вводимых пространственно-временных ограничений (параметров орбит, координат элементов НКУ, зон радиовидимости и т. д.);

– технических ограничений (ТТХ космических средств, времени их непрерывной работы в цикле, общего количества циклов (ресурсного обеспечения), переналадки, диагностирования, регламентных работ, уровня электромагнитной совместимости и т. д.);

– технологических ограничений — сведений о составе, структуре технологических циклов управления (ТЦУ), характеристик каждой технологической операции (объема, времени выполнения, требований по качеству выполнения, запрета на разрывность выполнения операций управления);

– множеств способов и методов реализации технологий навигации и управления основными элементами и подсистемами;

– возможных сценариев воздействия возмущающих факторов на элементы и подсистемы БНО и ПС КВНО в целом;

– показателей качества функционирования основных элементов и подсистем БНО, позволяющих качественно оценить показатели потенциальной эффективности аттестуемых технических решений;

– временных интервалов моделирования.

С учетом изложенного предметом разработки, определяющим перечень ее научно-технической (нормативно технической) документации, должны служить:

– система моделирования процессов функционирования средств БНО орбитального сегмента СС в составе средств КВНО и его взаимодействия с потребителями навигационной информации в формате перечня соответствующих средств программно-алгоритмического обеспечения;

– ориентировочная структура и состав средств комплекса, способного осуществлять имитационное моделирование исследуемых задач на основе разработанных пакетов прикладных программ.

Взаимодействие спутников навигационной или телекоммуникационной системы с НКУ характеризуется [8] посредством описания ТЦУ. Орбитальная группировка при этом рассматривается с позиций модели рабочей нагрузки.

Качество ТЦУ определяется степенью выполнения целевых задач либо отдельным спутником из состава орбитальной группировки (ОГ), включая и спутники-ретрансляторы, либо СС в целом и зависит от качества эксплуатационно-технических параметров ТЦУ.

При моделировании процессов функционирования средств БНО целесообразно подразделить декомпозицию общей задачи КВНО, выделив пять типовых вариантов ее технической реализации:



- 1) типовой вариант многопунктной (многопунктовой) технологии;
- 2) многовариантная технология навигационных определений повышенной точности на основе применения режима дифференциальной коррекции;
- 3) вариант однопунктной (однопунктовой) технологии на основе решения прямой навигационной задачи;
- 4) вариант комплексного использования технологий межспутниковых измерений совместно с технологиями наземного ЭВО;
- 5) вариант технологий БНО, ориентированных на решение задач автономной навигации.

Для каждого типа ИСЗ (спутниковой системы) должен быть определен свой функционально полный набор сеансов связи. Тогда описатели средств БНО могут строиться на базе описателей технических средств [8], задействуемых для решения навигационной задачи.

Указанный подход делает необходимым формирование баз данных основных объектов исследования, участвующих в процедуре имитационного моделирования их функционирования, что дает основание отнести комплекс к классу интеллектуализированных.

К числу предусматриваемых баз данных относятся:

- НКУ в виде совокупности характеристик технических средств ОКИК и ЦУП, причем указанные объекты могут считаться определенными, если для их полной совокупности введены модели «возмущений» (отсутствие, неисправности, периоды технического обслуживания, нештатные ситуации и т. д.);

- ОГ СС, разделяемые на структуры однотипных спутников, имеющих определенный фиксированный набор одинаковых характеристик, описывающих их взаимодействие со средствами НКУ, и на структуры с разнотипными ИСЗ (все остальные возможные случаи).

В зависимости от характера и постановки решаемых задач алгоритмическое обеспечение функционирования комплекса должно, по возможности, иметь иерархическую структуру, допускающую его перестройку, которая позволяет выбирать направления поиска решения в условиях следующих вариаций:

- внешних условий:

- условия антагонистических отношений (военное время, помеховые противодействия, прекращения действия договорных обязательств),

- условия максимального благоприятствования внешней обстановки (международное сотрудничество, открытость информации, возможность максимально допустимого использования иностранных разработок и технологий);

- конечных вариантов искомых решений:

- экспертной оценки уровня эффективности формирования автоматизированного ТЦУ (на основе методов сетевого моделирования),

– решения задач многокритериального синтеза оптимальных технологий БНО (на основе подхода, базирующегося на принципах выбора функций ценности альтернатив),

– предварительного анализа результатов проектно-баллистических решений (на основе методов экспертных оценок при наличии нечеткой исходной информации).

«Обобщенные возмущения», вызываемые вариациями внешней среды и внешними воздействиями неопределенного уровня, должны моделироваться введением в комплексную модель общей блокировки.

**7. Структура комплекса.** Автоматизированный комплекс программ уровня системной компоненты должен содержать следующие элементы:

- монитор (управляющую программу) комплекса;
- диспетчера (администратора) комплекса в целом и базы данных;
- информационно-справочную систему;
- систему отображения и документирования выходных данных.

Функционирование комплекса может быть поддержано применением следующего программного обеспечения, разработанного и эксплуатирующегося в настоящее время в организациях Федерального космического агентства (Объединенной ракетно-космической корпорации) и Министерства обороны РФ:

1. Сервисные компоненты.

Ведение фундаментальных констант.

Формирование логической шкалы моделирования движения спутника.

Ведение координат измерительных средств наземных пунктов.

Формирование и обслуживание массивов астрономического ежегодника.

Ведение поправок времени UTC-ИТА.

Формирование и обслуживание параметров вращения Земли (ПВЗ).

Ведение массивов индексов геогелиофизических факторов.

Ведение и коррекция модели атмосферы.

Регистрация измеряемых параметров (краевых условий), обслуживание допусков на измеряемые параметры.

Ведение технологических данных измерительных средств.

Формирование задержек эталона навигационного сигнала.

Формирование и обслуживание каталога звезд.

Обслуживание навигационных кадров и апостериорных эфемерид ГЛОНАСС.

2. Компоненты первичной баллистики.

Предварительная обработка измерительной информации, в том числе в форматах QUICK-LOOK, MERIT-2, RINEX.

Моделирование измерительной информации (заданной выборки измерений текущих навигационных параметров (ИТНП) при фиксированных ограничениях и ошибках измерений).

Построение эталонных орбит.

Уточнение параметров моделей движения по измерениям или граничным условиям.

Согласование параметров моделей движения (моделей внешних факторов).

3. Компоненты вторичной баллистики.

Обеспечение задач предполетной подготовки и расчет стандартной баллистической информации (СБИ).

Априорная и апостериорная оценка точности прогнозирования орбит.

Расчет таблиц узловых значений.

Определение параметров состояния системы (параметров орбитальной структуры, оценка времени деградации и др.).

Оценка условий связи потребителя со спутником на геостационарной орбите.

Расчет опорной и возмущенной (эволюционирующей) орбит.

Расчет углов Солнце — Объект — Земля.

Определение солнечно-синхронных орбит.

Расчет координат небесных тел и углового положения спутника относительно Луны, Солнца и звезд.

4. Компоненты генерации и обработки форм (ОФ).

Обработка форм представления баллистической информации.

Расчет форм с начальными условиями движения и циклограммами проведения коррекций.

5. Компоненты отображения информации.

Отображение трассы (трасс) полета.

Отображение положения совокупности спутников на геостационарных орбитах.

Отображение зон видимости спутника с наземных пунктов.

Отображение светотеневой обстановки на поверхности Земли и на орбите.

Отображение зон обслуживания наземных потребителей.

Построение 3D-изображений РНСС.

Техническая реализация комплекса потребует создания (доработки) многомашинной распределенной вычислительной системы кластерной структуры с современными ЭВМ среднего класса в качестве сетевых серверов.

**8. Язык программирования и программное обеспечение.** Известно, что к числу особенных характеристик программного обеспечения имитационного моделирования процессов функционирования динамических систем широкого назначения относятся:

а) способность к отслеживанию в общем модельном времени различных процессов и информационных потоков;

б) возможность уточнения параметров динамических систем на основе проведения виртуального экстремального эксперимента.

Исторически для создания программного обеспечения имитационного моделирования использовался пакет программ Microsoft, а также UML (Unified Modeling Language).

В последние годы появилось достаточно большое число специальных современных имитационных пакетов, реализующих различные подходы к объектно-ориентированному моделированию. Прежде всего, они представлены языком моделирования Modelica и реализованы в явном виде в пакетах Anylogic, MvStudium, Ptolemy II, неявно — в Simulink, Stateflow и других пакетах Matlab.

Заметим, однако, что условия целесообразности максимального использования имеющихся наработок исключают возможность выбора оптимального варианта развития аппаратно-программных средств и заставляют ограничиться сопоставительным анализом следующих вариантов:

1) программного комплекса в среде ОС MS BC 3.0 (редакция 13) — монитора и единой базой баллистических данных, функционирующих на основе системы управления базами данных (СУБД) «Линтер-ВСМ» 6.0 с данными параметров вращения Земли (ПВЗ) в виде Standart EOP-файлов и универсальным обменным форматом RINEX, используемым для приема, обработки и записи в баллистическую базу данных (ББД) оперативной эфемеридной и частотно-временной информации (ЧВИ) по КНС ГЛОНАСС и GPS;

2) среды программирования КОММОД, разработанной в Информационно-аналитическом центре координатно-временного и навигационного обеспечения ФГУП ЦНИИмаш [6, 17].

Несмотря на, казалось бы, очевидные преимущества первого из указанных подходов, решение вопроса предпочтения какому-либо варианту не является очевидным и потребует дополнительных сравнений.

Дело заключается в следующем. Первый из рассматриваемых подходов, как известно, используется в БЦ НКУ наряду с ИТНП наземных средств, главным образом, при решении задач оперативного управления. Понятно, что необходимым условием построения программно-математического обеспечения (ПМО) на основе базовых программных средств явилось условие унификации используемых методик и алгоритмов, информационных потоков и средств доступа к единому, интегрированному БД, а также стандартизации протоколов и интерфейсов. Но все это было ориентировано под решение задач исполнительской баллистики.

Назначением же обсуждаемого комплекса является создание программно-алгоритмического обеспечения, ориентированного, прежде всего, на проектную баллистику и разработку средств БНО проектного этапа.

**9. Заключение и выводы.** Создание Комплекса моделирования условий функционирования орбитального сегмента глобальных нави-

гационных и телекоммуникационных геостационарных спутниковых систем в рассмотренной постановке будет способствовать повышению объективности и обоснованности рассмотрения и принятия к дальнейшей проработке предлагаемых наиболее эффективных технических решений, в том числе и альтернативных по отношению к совершенствованию средств и параметров ФКВО, ориентированных на модернизацию существующих и создание более совершенных перспективных СС широкого назначения.

По своей значимости предложения подобного уровня, реализация которых невозможна без создания кооперации заинтересованных в ее создании субъектов, заслуживает, по крайней мере, широкого обсуждения, и в случае положительной реакции — рассмотрения возможности их включения в состав приоритетных мероприятий, выполняемых в рамках соответствующей Федеральной целевой программы (ФЦП).

Представляется возможным предположить, что после всестороннего тестирования вновь разрабатываемых средств программно-математического обеспечения и аттестации готового к принятию в эксплуатацию Комплекса возникнут предпосылки:

- для перехода от фрагментарных решений к системному решению проблемы сертификации средств и систем БНО спутниковых систем различного назначения (прежде всего, навигационных);
- поиска путей исключения рисков при модернизации ОГ систем типа ГЛОНАСС и других аналогичных ей;
- оценки необходимости и эффективности разработки и внедрения нового навигационного кадра, модернизации и создания нового наземного и бортового комплексов управления;
- обоснования эффективности методов решения навигационных задач и их алгоритмического обеспечения, типа решения систем нормальных уравнений (СНУ), расчета характеристик приближений, содержащих поправки к элементам орбиты, поправок в кинематические параметры, уточнения баллистического коэффициента, расчета суммарных поправок, весовых коэффициентов расчета точностных характеристик, используемого в решении состава и количества измерений, числа обусловленности и ранга матрицы СНУ и др.;
- оценки эффективности различных типов применяемых фильтров и методов предотвращения расходимости процесса фильтрации;
- определения предельно достижимых уровней точности прогнозирования и расчета отклонений прогнозируемых параметров движения ИСЗ от эталонных, а также оценки возможностей использования других средств и методов баллистического обеспечения полета, оказывающих непосредственное влияние на достижение требуемой точности спутниковой навигации;
- оценки устойчивости функционирования к действию различных внешних воздействий аппаратурно-программного комплекса уточнения ЭВИ глобальной навигационной системы в целом и выявления возможных неконтролируемых причин сбоев в его работе.

Отдавая себе отчет в высокой степени уязвимости содержания материалов настоящей статьи, ориентированных на изложение концептуального подхода к решению важной научно-технической и практически значимой проблемы, авторы, тем не менее, выражают надежду, что эти материалы не окажутся незамеченными и послужат, пусть даже в самой малой мере, делу дальнейшего прогресса отечественной космонавтики.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Болкунов А.И. *Разработка и применение методики оценки эффективности глобальных навигационных спутниковых систем*. Дисс. ... канд. техн. наук. Москва, МАИ, 2011.
- [2] Бояреева О.В. *Применение методов имитационного моделирования для исследования точности беззапросных траекторных измерений по навигационным спутникам ГЛОНАСС*. Дисс. ... канд. техн. наук. ФГУП «СНИИМ», 2011.
- [3] Владимиров В.М., Гречкосеев А.К., Толстикова А.С. Имитатор измерительной информации для отработки ЭВО ГЛОНАСС. *Измерительная техника*, 2004, № 8, с. 12–14.
- [4] Елубаев С.А., Джамалов Н.К., Алипбаев К.А. и др. Имитационное моделирование основных компонентов системы управления движением космического аппарата. *Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. акад. М.Ф. Решетнева*, 2013, №2 (48).
- [5] Иванов Н.М., Лысенко Л.Н. *Баллистика и навигация космических аппаратов*. 2-е изд., перераб. и доп. Москва, Дрофа, 2004.
- [6] Игнатович Е.И., Золкин И.А., Щекутьев А.Ф. Исследование возможностей межспутниковых измерений — связи в КНС ГЛОНАСС на основе модельного анализа алгоритмов обработки МСИ для уточнения параметров движения и синхронизации шкал времени КА ГЛОНАСС. Доклад на семинаре ИКИ РАН. Таруса, 2011.
- [7] Кружков Д.М. *Современные и перспективные интегрированные системы высокоточной навигации КА на геостационарной и высоких эллиптических орбитах на основе использования ГНСС-технологий*. Дисс. ... канд. техн. наук. Москва, МАИ, 2014.
- [8] Лысенко Л.Н., Бетанов В.В., Звягин Ф.В. *Теоретические основы баллистико-навигационного обеспечения космических полетов*. Монография. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014.
- [9] Урличич Ю.М., Ежов С.А., Жодзишский А.И., Круглов А.В., Махненко Ю.Ю. *Современные технологии навигации геостационарных спутников*. Москва, Физматлит, 2006.
- [10] Бартенев В.А., Красильщиков М.Н., ред. *Современные и перспективные информационные ГНСС-технологии в задачах высокоточной навигации*. Москва, Физматлит, 2014.
- [11] Соловьев В.А., Лысенко Л.Н., Любинский В.Е. *Управление космическими полетами*. В 2-х ч. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009 (ч. I), 2010 (ч. II).
- [12] Строгалев В.П., Толкачева И.О. *Имитационное моделирование*. 2-е изд., исправл. и доп. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015.
- [13] Ступак Г.Г., Лысенко Л.Н., Бетанов В.В. и др. Состояние и перспективы совершенствования орбитальных структур навигационных спутниковых систем. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия Приборостроение*, 2014, №1 (94), с. 3–18.

- [14] Ступак Г.Г., Лысенко Л.Н., Бетанов В.В. Оценка устойчивости орбитальной группировки ГЛОНАСС и анализ влияния возмущающих факторов на ее деградацию. *Вестник МГТУ им. Н.Э.Баумана. Серия Машиностроение*, 2014, № 2, с. 62–69.
- [15] Финкельштейн А.М. Фундаментальное координатно-временное обеспечение: 2010–2020 годы. URL: [www.vega.nsu.ru/.../vak\\_P\\_Finkelshtein.pdf](http://www.vega.nsu.ru/.../vak_P_Finkelshtein.pdf).
- [16] Финкельштейн А.М., Ипатов А.В., Скурихина Е.А. и др. Фундаментальное координатно-временное обеспечение системы ГЛОНАСС средствами РСДБ-сети «Квазар-КВО». *Труды ИПА РАН*. Санкт-Петербург, Наука, 2007, т. 77, № 7, с. 608–617.
- [17] Щекутьев А.Ф. Синхронизация БШВ НКА ГЛОНАСС по набору межспутниковых измерений вдоль замкнутой цепочки межспутниковых взаимодействий. Семинар ИКИ РАН памяти П.Е. Эльясберга. Таруса, 17–19 июня 2014 г.
- [18] Янчик А.Г., Квашин А.Г. *Научно-технические принципы построения программных комплексов для решения задач обработки измерений от автономной системы радионавигации КА в баллистическом центре НАКУ*. Москва, РКП и НС, 2014, т. 1, вып. 1, с. 47–54.

Статья поступила в редакцию 30.05.2015

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Лысенко Л.Н., Корянов В.В., Топорков А.Г. Концепция разработки программно-методического обеспечения комплекса имитационного моделирования условий функционирования орбитального сегмента глобальных навигационных и телекоммуникационных геостационарных спутниковых систем. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2015, вып. 5. URL: <http://engjournal.ru/catalog/arise/adb/1398.html>

**Лысенко Лев Николаевич** — д-р техн. наук, профессор, заслуженный деятель науки, заслуженный изобретатель РФ, почетный работник высшего профессионального образования России, лауреат премии Президента РФ. Действительный член и член президиума Российской академии ракетных и артиллерийских наук и Российской академии космонавтики им. К.Э. Циолковского. Профессор кафедры «Динамика и управление полетом ракет и космических аппаратов» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 300 опубликованных научных работ и изобретений в области баллистики, навигации и управления движением беспилотных летательных аппаратов. e-mail: [kafsm3@bmstu.ru](mailto:kafsm3@bmstu.ru)

**Топорков Алексей Геннадьевич** — аспирант очного обучения кафедры «Динамика и управление полетом ракет и космических аппаратов» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор трех опубликованных работ в области баллистики и динамики движения космических и спускаемых аппаратов. e-mail: [kafsm3@bmstu.ru](mailto:kafsm3@bmstu.ru)

**Корянов Всеволод Владимирович** — канд. техн. наук, доцент кафедры «Динамика и управление полетом ракет и космических аппаратов» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 10 научных работ в области моделирования баллистики и динамики движения космических и спускаемых аппаратов. e-mail: [kafsm3@bmstu.ru](mailto:kafsm3@bmstu.ru)

# A development concept of program-methodical support for the simulation complex of functioning conditions of the orbital segment of global navigation and telecommunication geostationary satellite systems

L.N. Lysenko, A.G. Toporkov, V.V. Koryanov

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

*The article presents a concept of creating an information-computing complex of simulation in the form of adequate digital analogue of spatiotemporal field of ballistic navigation support for the functioning of the orbital segment of satellite systems, together with the "additions" and associated dynamic processes, included in the sphere of consumers' interests of satellite navigation of information.*

**Keywords:** simulation modeling, ballistic and navigation support, fundamental coordinate and time support, satellite systems, GLONASS.

## REFERENCES

- [1] Bolkunov A.I. *Razrabotka i primeneniye vetodiki otsenki effektivnosti globalnykh navigatsionnykh sputnikovykh system* [Development and application of method of estimation of efficiency global navigation satellite systems]. Cand. of Engineering Sci. Thesis, Moscow, 2011, 155 p.
- [2] Boyareyeva O.V. *Primeneniye metodov imitatsionnogo modelirovaniya dlya issledovaniya tochnosti bezzaprosnykh traektornykh izmereniy po navigatsionnym sputnikam GLONASS* [Application of simulation techniques for study the accuracy unrequestless trajectory measurements of navigation satellites GLONASS]. Cand. of Engineering Sci. Thesis, Novosibirsk, 2011, 127 p.
- [3] Vladimirov V.M., Grechkoseev A.K., Tolstikov A.S. *Izmeritel'naya tekhnika — Measurement Techniques*, 2004, no. 8, pp. 12–14 (in Russ).
- [4] Elubaev S.A., Jamalov N.K., Alipbaev K.A. et al. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta imeni akademika M.F. Reshetneva — Vestnik SibGAU*, 2013, no. 2 (48), pp. 13–18 (in Russ).
- [5] Ivanov N.M., Lysenko L.N. *Ballistika i navigatsiya kosmicheskikh apparatov* [Ballistics and navigation of spacecrafts]. 2nd ed. Moscow, Drofa Publ., 2004, 544 p.
- [6] Ignatovich E.I., Zolkin I.A., Schekutev A.F. *Isledovanie vozmozhnoy mezh-sputnikovykh izmereniy — svyazi v KNS GLONASS na osnove modelnogo analiza algoritmov obrabotki MSI dlya utochneniya parametrov dvizheniya i sinkhronizatsii shkal vremeni KA GLONASS. Doklad na seminare IKI RAN in Tarusa, 2011* [Investigation of possibilities of inter-satellite measurement — communication GLONASS-based model analysis algorithms ISM to refine your movements and synchronization of time scales of GLONASS satellites. The report at the seminar IKI RAS, Tarusa, 2011]. Available at: <http://www.iki.rssi.ru/seminar/2011070508/presentation/Chekutiev.ppt> (accessed June 23, 2015).
- [7] Kruzhkov D.M. *Sovremennye i perspektivnye integrirovannye sistemy vysokotochnoi navigatsii KA na geostatsionatnoi i vysokikh ellipticheskikh orbitakh na osnove ispolzovaniya GNSS-tekhnologiy* [Current and advanced integrated system of high-precision navigation satellites in geostationary and high elliptic orbits based on the use of GNSS technologies]. Cand. of Engineering Sci. Thesis, Moscow, 2014, 134 p.



- [8] Lysenko L.N., Betanov V.V., Zvyagin F.V. *Teoreticheskiye osnovy ballistiko-navigatsionnogo obespecheniya kosmicheskikh poletov* [Theoretical foundations of ballistics navigation support space missions]. Moscow, BMSTU Publ., 2014, 518 p.
- [9] Urlichich Yu.M., Yezhov A.I., Zhodzishsky A.I., Kruglov A.V., Makhnenko Yu.Yu. *Sovremennyye tekhnologii navigatsii geostatsionarnykh sputnikov* [Modern technology navigation geostationary satellites]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2006, 272 p.
- [10] Bartenev V.A., Grechkoseyev A.K., Kozorez D.A., Krasil'shchikov M.N., Sebryakov G.G., Sypalo K.I., Pasyukov V.V. *Sovremennyye i perspektivnyye informatsionnyye GNSS-tekhnologii v zadachakh vysokotochnoy navigatsii* [Modern and perspective GNSS of information technology in problems of high-precision navigation]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2014, 191 p.
- [11] Solovyev V.A., Lysenko L.N., Lyubinskiy V.Ye. *Upravleniye kosmicheskimi poletami. V 2 chastyakh* [Control of space flights. In 2 parts.]. Moscow, BMSTU Publ., 2009, part 1, 446 p.
- [12] Strogalev V.P., Tolkachev I.O. *Imitatsionnoye modelirovaniye* [Simulation modeling]. 2<sup>nd</sup> ed. Moscow, BMSTU Publ., 2015, 280 p.
- [13] Stupak G.G., Lysenko L.N., Betanov V.V. et al. *Vestnik MGTU imeni N.E. Baumana. Seriya Priborostroyeniye — Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Insrtment Engineering*, 2014, no. 1, pp. 3–18 (in Russ).
- [14] Stupak G.G., Lysenko L.N., Betanov V.V. *Vestnik MGTU imeni N.E. Baumana. Seriya Mashinostroyeniye — Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Mechanical Engineering*, 2014, no. 2, pp. 62–69 (in Russ).
- [15] Finkelstein A.M. *Fundamentalnoe koordinatno-vremennoe obespechenie: 2010–2020 gody* [The fundamental coordinate and time support: 2010–2020]. Available at: [http://vega.nsu.ru/First%20Hand%20Astronomy/Presentations/VAK\\_P\\_Finkelshtein.pdf](http://vega.nsu.ru/First%20Hand%20Astronomy/Presentations/VAK_P_Finkelshtein.pdf) (accessed June 23, 2015).
- [16] Finkelstein A.M., Ipatov A.V., Skurikhina E.A., Smolentsev S.G., Surkis I.F. *Fundamentalnoe koordinatno-vremennoe obespechenie sistemy GLONASS sredstvami RSDB-seti "Kvazar-KVO"* [The fundamental coordinate and time support for the GLONASS system means RSDB-network "Quasar-KVO"]. *Trudy IPA RAN* [Proceedings of IAA RAS]. St. Petersburg, Nauka Publ., 2007, vol. 77, no. 7, pp. 608–617 (in Russ).
- [17] Schekutev A.F. *Sinkhronizatsiya BSHV NKA GLONASS po naboru mezhsputnikovykh izmereniy vdol zamknutoi tseppochki mezhsputnikovykh vzaimodeistviy. Doklad na seminaru IKI RAN pamyati P.E.Elyasberga. Tarusa, 17–19 iyunya 2014 g.* [Synchronization BSHV GLONASS to recruit inter-satellite measurement along a closed chain of inter-satellite interactions. The report of the seminar IKI memory P.E. Elyasberga. Tarusa, 17-19 June 2014]. Available at: [http://www.iki.rssi.ru/seminar/2014061719/presentation/1806\\_03\\_02\\_schekutjev.pptx](http://www.iki.rssi.ru/seminar/2014061719/presentation/1806_03_02_schekutjev.pptx) (accessed June 23, 2015).
- [18] Yanchik A.G., Kvashnin A.G. *Nauchno-tekhnicheskiiy zhurnal "Raketno-kosmicheskoye priborostroyeniye i informatsionnyye sistemy"* — Scientific and technical journal "Rocket and Space Instrumentation and Information Systems", 2014, vol. 1, iss. 1, pp. 47–54.

**Lysenko L.N.** Dr. Sci. (Eng.), professor of the “Dynamics and Flight Control of Rockets and Spacecrafts” Department at the Bauman Moscow State Technical University, Honoured Scientist of the Russian Federation, Honoured Inventor of the Russian Soviet Federative Socialist Republic, Russian Federation Presidential Award Recipient, Academician and Presidium Member of Russian Academy of Rocket and Artillery Engineering (RARAN) and of the Russian Academy of Cosmonautics named after K.E. Tsiolkovsky.

Author of more than 300 publications and inventions on ballistics, flight dynamics and rocket and spacecraft motion control. e-mail: kafsm3@bmstu.ru

**Топорков А.Г.**, full-time postgraduate student of the “Dynamics and Flight Control of Rockets and Spacecrafts” Department at the Bauman Moscow State Technical University. Author of 3 publications in the field of ballistics and dynamics of motion of space and descent vehicles. e-mail: kafsm3@bmstu.ru

**Корянов В.В.**, Cand. Sci. (Eng.), assoc. professor of the “Dynamics and Flight Control of Rockets and Spacecrafts” Department at the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 10 publications in the field of simulation of ballistics and dynamics of motion of space and descent vehicles. e-mail: kafsm3@bmstu.ru