

## Анализ особенностей технической реализации дополняющего высокоорбитального космического комплекса системы ГЛОНАСС

© В.М. Мещеряков, В.Ф. Брагинец, Ю.Г. Сухой

Филиал «Прецизионного навигационно-баллистического обеспечения»  
АО «НПК «Системы прецизионного приборостроения», г. Королёв, 141092, Россия

*Рассмотрены особенности реализации высокоорбитального космического комплекса (ВКК), дополняющего систему ГЛОНАСС. Показано, что условия целевого использования навигационных аппаратов ВКК на геосинхронных орбитах по сравнению с орбитами ГЛОНАСС существенно различаются ввиду увеличения дальности от спутника до наземного потребителя, а также возрастания возмущающего влияния немоделируемых ускорений, обусловленных погрешностями модели радиационного давления. Паритет со спутником ГЛОНАСС по уровню навигационного сигнала, принимаемого наземными потребителями, при переходе на другой тип орбит возможен при усложнении конструкции спутника ВКК, реализации специального программного обеспечения центра управления ВКК, отличного от используемого в центре управления ГЛОНАСС, а также при внесении изменений в структуру информации навигационного сигнала. Сделан вывод о том, что преимуществ, обеспечиваемых ВКК, можно добиться меньшими усилиями, в первую очередь, путем добавления штатно используемых спутников в существующие орбитальные плоскости с последующим равномерным перераспределением спутников всей орбитальной группировки по аргументу широты, во вторую очередь, за счет размещения спутников ГЛОНАСС в дополнительных орбитальных плоскостях, располагаемых между существующими плоскостями. Предложенные варианты расширения системы ГЛОНАСС со штатными круговыми орбитами не уступают по наблюдаемости варианту дополнения системы ГЛОНАСС ВКК, но, в отличие от него, обеспечивают высокую наблюдаемость в глобальном масштабе, а не только на территории Российской Федерации.*

**Ключевые слова:** ГЛОНАСС, высокоорбитальный космический комплекс, навигационный спутник, геосинхронная эллиптическая орбита, дальность, немоделируемые ускорения, модель радиационного давления, альманах системы

**Введение.** Одним из перспективных направлений развития и совершенствования отечественной глобальной навигационной системы ГЛОНАСС является дополнение ее орбитальной структуры космическими аппаратами (КА) высокоорбитального космического комплекса (ВКК), размещаемыми на эллиптических орбитах типа QZSS. Согласно [1, 2] предполагается использовать шесть КА ВКК в трех орбитальных плоскостях — по два КА в каждой. Наклонения орбит КА ВКК будут равны  $64,8^\circ$ , большие полуоси орбит составят около 42 164 км, эксцентриситеты — 0,072. Траектории КА на поверхности Земли за счет раз-

несения КА в плоскостях орбит будут образовывать две трассы с географическими долготами восходящих узлов  $60^\circ$  и  $120^\circ$ .

В опубликованных ранее работах [3, 4] была рассмотрена оценка условий одновременного наблюдения потребителем максимально возможного количества КА для подобной высокоэллиптической орбиты и предложены способы построения орбитальной группировки КА ВКК, обеспечивающей круглосуточное выполнение условий наблюдения не менее трех КА с территории Российской Федерации. В настоящей работе проведен анализ особенностей реализации дополняющего высокоорбитального космического комплекса для обеспечения требуемой точности определения местоположения потребителя при использовании навигационных сигналов КА ВКК совместно с навигационными сигналами КА ГЛОНАСС.

**Оценка погрешностей эфемерид КА ВКК.** Погрешность вычисления координат в навигационной аппаратуре потребителей при использовании КА системы ГЛОНАСС совместно с ВКК будет определяться, в том числе следующими факторами:

- разными условиями приема потребителями навигационных сигналов от КА ВКК и штатных КА ГЛОНАСС;
- погрешностью эфемеридно-временной информации, передаваемой в навигационных сообщениях КА ВКК;
- особенностями учета в навигационной аппаратуре потребителей (НАП) цифровой информации, содержащейся в навигационных сообщениях, принимаемых с КА ВКК.

Условия приема потребителями навигационных сигналов от КА ВКК, как известно [5], определяются положением КА относительно потребителя по азимуту и углу места, а также дальностью от КА до потребителя. Условия приема сигналов КА ВКК, рассмотренные в [3, 4], по угловым параметрам отличаются от условий приема сигналов КА ГЛОНАСС в лучшую сторону с точки зрения большей длительности зоны радиовидимости и нахождения КА ВКК на высоких углах наблюдения относительно земной поверхности. Однако дальность от КА ВКК до потребителя становится существенно больше. Дополняющую орбитальную структуру ВКК предполагается строить так, чтобы участок полета каждого КА вблизи апогея орбиты наблюдался с территории Российской Федерации на максимально возможных углах места [2–4]. В табл. 1 приведена оценка дальности от потребителя до КА ГЛОНАСС на максимально возможных углах места и до КА ВКК. Данные табл. 1 показывают, что дальность до КА ВКК на максимальных углах места в 2 раза больше, чем до КА ГЛОНАСС. Поэтому для достижения требуемого уровня принимаемого потребителями сигнала у КА ВКК должна быть увеличена мощность бортового передатчика, что повлечет изменение бюджета энергопотребле-

## Оценка дальности до КА на максимальных углах наблюдения

Тип орбиты	Дальность от потребителя до КА, км	Увеличение дальности относительно КА ГЛОНАСС
ГЛОНАСС (круговая)	19140	—
ВКК (высокоэллиптическая)	38820	2,03

ния между бортовыми системами или увеличение площади панелей солнечных батарей по сравнению с КА ГЛОНАСС.

Известно [6–8], что для навигационных КА ГЛОНАСС основным фактором, влияющим на точность прогнозирования эфемерид, являются возмущающие ускорения, обусловленные погрешностью моделирования сил давления прямого и отраженного солнечного излучения, а также других малых сил, которые возникают при работе систем ориентации, стабилизации и терморегулирования. «Наибольший вклад» в немоделируемые возмущающие ускорения вносит неточность учета давления прямого солнечного излучения ввиду невозможности достаточно полного описания геометрической формы КА и ориентации его поверхности относительно направления на Солнце. Это связано также с тем, что на высоких эллиптических орбитах возникают дополнительные требования к точности системы ориентации и стабилизации навигационного КА, что требует доработки указанных систем.

Дополнительно, степень влияния немоделируемых ускорений на прогноз эфемерид КА определяется не только их значением, но и соотношением со значением ускорения от силы притяжения Земли. При переходе на более высокие орбиты по сравнению со штатными орбитами системы ГЛОНАСС влияние ускорения от силы притяжения Земли уменьшается, а воздействие немоделируемых возмущающих ускорений на прогноз эфемерид в процентном отношении возрастает. Для оценки указанной зависимости были выполнены расчеты отклонений прогноза положения КА в радиальном направлении от номинального значения в течение одних суток при одинаковом возмущении ускорения от прямого солнечного излучения на орбитах ГЛОНАСС и геосинхронных орбитах типа QZSS. Угол между плоскостью орбиты и направлением на Солнце был выбран близким к нулевому значению, при котором возмущающее воздействие рассматриваемого ускорения на внутрисферические элементы орбиты максимально. Номинальное значение коэффициентов светового давления для всех орбит было принято одинаковым и соответствующим среднему значению для КА ГЛОНАСС, влияние погрешностей моделировалось изменением значений коэффициентов светового давления на 1 % от номинальных. Результаты расчетов приведены в табл. 2.

**Оценка максимальных погрешностей прогноза эфемерид КА в радиальном направлении на суточном интервале при изменении значений коэффициентов светового давления на 1%**

Тип орбиты	Погрешность прогноза эфемерид, м	Увеличение относительно ГЛОНАСС
ГЛОНАСС (круговая)	0,15	—
ВКК (высокоэллиптическая)	0,43	2,9

Степень влияния погрешностей учета давления от прямого солнечного излучения на точность прогноза эфемерид в радиальном направлении для геосинхронных орбит КА ВКК в 2,9 раза больше, чем для орбит КА ГЛОНАСС (см. табл. 2). Это превышение может оказаться ощутимо больше при увеличении размеров солнечных батарей, а также за счет ошибок системы ориентации и стабилизации, требования к точности работы которой на высокоэллиптических орбитах существенно возрастают. В этой связи для КА ВКК в наземном контуре управления необходимо разработать и реализовать более сложную по сравнению с моделью для КА ГЛОНАСС модель учета сил радиационного давления на КА ВКК, включающую в себя указанные выше факторы. Влияние отраженной радиации и теплового излучения Земли для орбит КА ВКК по абсолютной величине приблизительно в 500 раз слабее потока прямой солнечной радиации, поэтому для учета ускорений, вызываемых данными факторами, можно применять простые модели. Однако в отличие от моделей для КА ГЛОНАСС они должны учитывать эллиптичность орбиты КА ВКК.

**Оценка погрешностей определения координат наземного потребителя.** В целях уточнения требований к точности эфемеридного обеспечения КА ВКК были проведены аналитические оценки среднеквадратических погрешностей (СКП) определения координат наземного потребителя для заданных значений СКП погрешностей эфемерид и частотно-временных поправок (поправок к часам КА), принимаемых потребителем в составе навигационного сигнала, глобально вдоль параллелей Земли. Для проведения оценок была использована модель движения группировки 24 космических аппаратов системы ГЛОНАСС и шести КА ВКК [4]. Для расчета СКП определения координат потребителей в плане и по высоте модель оценки геометрического фактора [4] была доработана в части расчета ковариационной матрицы погрешностей определения координат потребителя в топоцентрической системе координат. Ковариационную матрицу рассчитывали с использованием соотношений для оценки точности навигации потребителя [9]. Исходными данными стали погрешности эфемерид и поправок к часам КА. Для получения интегральных оценок было проведено осреднение точечных оценок с ша-

гом 2 мин на временном интервале, равном периоду повторяемости трасс КА ГЛОНАСС (8 сут) для потребителей, расположенных на разных долготах вдоль параллелей в пределах территории Российской Федерации на фиксированных широтах 45°, 55 и 70°. Расчеты выполняли для двух значений минимального угла места (10° и 30°), соответствующих нормальным и сложным условиям наблюдения [10].

В качестве исходных данных были взяты глобальные значения СКП, которые в перспективе должны быть достигнуты в результате работ по совершенствованию оперативного эфемеридного и частотно-временного обеспечения системы ГЛОНАСС в целях поддержания целевых индикаторов и показателей ФЦП [11]:

- погрешности показаний часов КА в линейной мере 0,5 м;
- погрешности эфемерид КА в радиальном и бинормальном направлениях 0,33 м, в трансверсальном 1 м.

Уровень погрешностей прогноза эфемерид у КА ВКК в 3 раза выше, чем у КА ГЛОНАСС (см. табл. 2). Оценка полученных осредненных глобально по долготам среднеквадратических погрешностей (СКП) определения координат потребителей для нормальных и сложных условий наблюдения КА ГЛОНАСС, КА ВКК [1, 2] и КА возможных дополнений системы ГЛОНАСС штатными КА [3, 4, 10] для разных широт (В) приведена в табл. 3 и 4.

Таблица 3

**Оценка СКП определения координат потребителя при нормальных условиях наблюдения ( $\gamma_{\min} = 10^\circ$ ) для разных широт, м**

В, град	Характеристика	Дополнение шести КА ВКК	Дополнение шести КА ГЛОНАСС		Штатная ОГ ГЛОНАСС
			в трех дополнительных плоскостях	в существующих плоскостях	
45	В плане	0,70	0,58	0,56	0,77
	По высоте	1,15	1,09	0,97	2,31
55	В плане	0,64	0,55	0,53	0,66
	По высоте	1,00	0,85	0,82	1,09
70	В плане	0,59	0,53	0,51	0,59
	По высоте	1,05	0,91	0,88	1,05

Таблица 4

**Оценка СКП определения координат потребителя в сложных условиях наблюдения ( $\gamma_{\min} = 30^\circ$ ) для разных широт, м**

В, град	Характеристика	Дополнение шести КА ВКК	Дополнение шести КА ГЛОНАСС		Штатная ОГ ГЛОНАСС
			в трех дополнительных плоскостях	в существующих плоскостях	
45	В плане	3,40	3,56	2,15	12,81
	По высоте	9,35	10,51	3,75	38,23
55	В плане	2,80	3,01	1,85	9,44
	По высоте	6,20	6,91	4,22	22,78
70	В плане	1,03	0,91	0,93	1,16
	По высоте	2,56	2,30	2,25	3,39

Как видно из табл. 3 и 4, для нормальных и сложных условий наблюдения КА наилучшая точность обеспечивается для варианта добавления штатно используемых КА ГЛОНАСС в существующие плоскости системы.

**Необходимость доработки альманаха системы.** Состав цифровой информации, передаваемой в существующем навигационном кадре навигационного сигнала ГЛОНАСС [12], включает в себя альманах системы. Альманах в форме, принятой для ГЛОНАСС, не может быть использован для передачи элементов орбиты КА ВКК по следующим причинам:

- диапазон значений времени первого (внутри суток) прохождения восходящего узла орбиты (слово  $t_{\lambda A}$ ) составляет от 0 до 44 100 с;
- диапазон значений эксцентриситета орбиты КА (слово  $\varepsilon_{nA}$ ) составляет от 0 до 0,03, что не подходит для высокоэллиптических орбит КА ВКК.

Кроме того, алгоритм расчета по альманаху кинематических параметров КА, приведенный в интерфейсном контрольном документе ГЛОНАСС [12], содержит аналитические соотношения для расчета поправок к кеплеровым элементам орбиты от влияния 2-й зональной гармоник, полученные для малых значений эксцентриситета. В альманаху КА ВКК на геосинхронных орбитах с драконическим периодом 86 400 с и ненулевым наклоном целесообразно включать данные с размерностями, приведенными в табл. 5.

Таблица 5

Размерности данных альманаха для КА ВКК

Параметр	Диапазон изменения	Максимальная цена младшего разряда	Альтернатива
Большая полуось	$42\,161 \pm 100$ км	$10^{-1}$	Среднее движение, драконический период
Эксцентриситет	0–1	$10^{-6}$	—
Наклонение	0–64°	$10^{-5}$	—
Долгота восходящего узла	0–360°	$10^{-5}$	—
Аргумент широты перигея	0–360°	$10^{-4}$	—
Аргумент широты КА	0–360°	$10^{-5}$	Долгота КА

Для орбит КА ВКК диапазон значений параметра  $t_{\lambda A}$  следует расширить в 2 раза, для чего достаточно увеличить длину слова на один двоичный разряд. Адаптация структуры альманаха под эллип-

тические орбиты КА ВКК требует увеличения количества двоичных разрядов части параметра  $\varepsilon_{nA}$  или перехода от представления числа с фиксированной запятой к числу с плавающей запятой для расширения рабочего диапазона значений эксцентриситета. Для КА ВКК необходимо также провести корректировку алгоритма расчета параметров движения КА по альманаху в части адаптации аналитической модели вычисления поправок в элементы орбиты КА от второй зональной гармоники.

**Устойчивость системы.** Следует также отметить, что высокоэллиптические орбиты КА ВКК менее устойчивы, чем штатные круговые орбиты системы ГЛОНАСС. Ввиду этого требуется дополнительно регулярно проводить коррекции их параметров в целях поддержания элементов орбит в заданных диапазонах. Это ведет к увеличению массы топлива для выполнения коррекций и к изменению технологического цикла управления КА ВКК. Данные вопросы требуют дополнительных исследований.

**Альтернативные варианты дополнения системы ГЛОНАСС.** В статье [10] были рассмотрены варианты дополнения системы ГЛОНАСС КА, предназначенные для использования на штатных круговых орбитах ГЛОНАСС. Предложено два варианта: дополнение КА в существующие орбитальные плоскости с последующим равномерным перераспределением КА всей орбитальной группировки по аргументу широты и размещение КА в дополнительных орбитальных плоскостях, располагаемых между существующими плоскостями. Данные, приведенные в табл. 3 и 4, свидетельствуют, что предложенные варианты [10] дополнения системы ГЛОНАСС КА на штатных круговых орбитах имеют существенные преимущества по наблюдаемости по сравнению с вариантом дополнения системы ГЛОНАСС КА ВКК, но, в отличие от него, обеспечивают лучшую наблюдаемость в глобальном масштабе, а не только на территории Российской Федерации. Использование вариантов [10] потребует значительно меньших затрат на реализацию в связи с тем, что отпадает необходимость в разработке КА для ВКК и модернизации наземного комплекса для управления им.

**Заключение.** Дополнение системы ГЛОНАСС высокоорбитальным космическим комплексом на высокоэллиптических геосинхронных орбитах потребует:

- внесения изменений в конструкцию КА ВКК по сравнению с КА ГЛОНАСС штатной орбитальной группировки в части систем электропитания, ориентации и стабилизации, а также в части аппаратуры излучения навигационного сигнала;
- разработки и экспериментальной отработки более сложных моделей и технологий эфемеридного и частотно-временного обеспечения КА ВКК;

— частичного изменения структуры неоперативной части навигационного кадра и алгоритмов использования в навигационной аппаратуре потребителя отдельных видов цифровой информации, передаваемых с КА ВКК.

Данных проблем можно избежать при реализации рассмотренных в статье [10] вариантов дополнения системы ГЛОНАСС КА, разрабатываемых для использования в существующей системе на круговых орбитах. Предлагается размещать по два КА в существующие орбитальные плоскости с последующим равномерным перераспределением КА всей орбитальной группировки по аргументу широты или по два КА в каждую из трех дополнительных орбитальных плоскостей, располагаемых между существующими плоскостями. Такие варианты дополнения системы ГЛОНАСС [10], требуя существенно меньших затрат на реализацию, не уступают по наблюдаемости варианту дополнения ВКК и обеспечивают лучшую наблюдаемость в глобальном масштабе, а не только на территории Российской Федерации.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Карутин С.Н., Митрикас В.В., Скакун И.О., Яремчук В.И. Архитектура системы высокоточного навигационного обеспечения потребителей ГЛОНАСС на территории Российской Федерации. *Космонавтика и ракетостроение*, 2017, № 5 (98), с. 133–139.
- [2] Малышев В.В., Старков А.В., Толстенков П.С., Федоров А.В. Методы поддержания параметров структуры высокоорбитальной группировки космических аппаратов для компенсации ухудшения ее функциональных возможностей. *Космонавтика и ракетостроение*, 2017, № 2 (95), с. 37–45.
- [3] Мещеряков В.М., Брагинец В.Ф., Сухой Ю.Г. Архитектура орбитальной группировки ГЛОНАСС, обеспечивающая глобальное выполнение перспективных требований по среднему значению пространственного геометрического фактора. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2018, вып. 10. DOI: 10.18698/2308-6033-2018-10-1816
- [4] Ватутин С.И. Оценка геометрического фактора для наземного потребителя системы ГЛОНАСС с высокоэллиптическим дополнением. *Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы*, 2016, т. 3, вып. 3, с. 12–28.
- [5] Ерохин Г.А., Чернышев О.В., Козырев Н.Д., Кочержевский В.Г. *Антенно-фидерные устройства и распространение радиоволн*. Москва, Радио и связь, 1996, 351 с.
- [6] Бартенев В.А., Красильщиков М.Н., ред. *Современные и перспективные информационные ГНСС-технологии в задачах высокоточной навигации*. Москва, Физматлит, 2014, 191 с.
- [7] Гречкосеев А.К., Марарескул Т.А. Построение модели сил радиационного давления излучения Солнца, влияющего на движение центра масс космического аппарата. *Известия вузов. Приборостроение*, 2004, № 4, с. 10–14.
- [8] Чувашов И.Н. Учет негравитационных эффектов в движении околоземных объектов. *Экологический вестник научных центров ЧЭС*, 2013, т. 3, с. 145–150.



- [9] Порфирьев Л.Ф., Смирнов В.В., Кузнецов В.И. *Аналитические оценки точности автономных методов определения орбит*. Москва, Машиностроение, 1987, 279 с.
- [10] Брагинец В.Ф., Мещеряков В.М., Сухой Ю.Г. Сравнение вариантов построения орбитальной группировки ГЛОНАСС в целях совершенствования её структуры для наблюдения навигационных спутников. *Космонавтика и ракетостроение*, 2017, № 1 (94), с. 95–102.
- [11] *Федеральная целевая программа «Поддержание, развитие и использование системы ГЛОНАСС на 2012 – 2020 годы»*. Приложение № 3.
- [12] *Глобальная навигационная спутниковая система ГЛОНАСС. Интерфейсный контрольный документ. Навигационный радиосигнал в диапазонах L1, L2 (ред. 5.1)*. Москва, Рос. научно-исслед. ин-т косм. приборостроения, 2008, 74 с.

Статья поступила в редакцию 15.01.2019

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Мещеряков В.М., Брагинец В.Ф., Сухой Ю.Г. Анализ особенностей технической реализации дополняющего высокоорбитального космического комплекса ГЛОНАСС. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2019, вып. 2.  
<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2019-2-1848>

**Мещеряков Владимир Михайлович** — канд. техн. наук, инженер 1-й категории филиала «Прецизионного навигационно-баллистического обеспечения» АО «НПК «Системы прецизионного приборостроения». Автор более 20 работ в области космической баллистики.

**Брагинец Владимир Феодосиевич** — канд. техн. наук, начальник отдела – главный конструктор направления филиала «Прецизионного навигационно-баллистического обеспечения» АО «НПК «Системы прецизионного приборостроения». Автор более 70 работ в области космической баллистики.  
e-mail: [braginet@spnav.ru](mailto:braginet@spnav.ru)

**Сухой Юрий Георгиевич** — д-р техн. наук, ведущий научный сотрудник филиала «Прецизионного навигационно-баллистического обеспечения» АО «НПК «Системы прецизионного приборостроения». Автор более 120 работ в области космической баллистики. e-mail: [sukhoi@spnav.ru](mailto:sukhoi@spnav.ru)

## Analyzing the peculiar features of GLONASS system's complementary high-orbital space complex technical implementation

© V.M. Mescheryakov, V.F. Braginets, Yu.G. Sukhoy

Precision Navigation and Ballistic Support, Branch of the Open Joint-stock Company  
“Research-and-Production Corporation “Precision Systems and Instruments”,  
Korolyov, 141092, Russia

*The article considers the implementation features of the high-orbital space complex (HOSC) that complements the GLONASS system. It is shown that the conditions of the HOSC navigation devices proper use in geosynchronous orbits greatly differ compared to GLONASS orbits due to the increase in the distance between the satellite and the land user as well as the growth of the perturbation influence of unmodelled accelerations conditioned by the inaccuracies of the radiation pressure model. Parity with the GLONASS satellite on the level of the navigation signal accepted by the terrestrial consumers when moving to a different type of orbit is possible by means of complicating the HOSC satellite structure, implementing the customized software of the HOSC control center different from the one used in the GLONASS control center as well as making changes to the navigation signal information structure. It is concluded that the benefits provided by the HOSC can be achieved with less effort, firstly, by means of adding the regularly used satellites to the existing orbital planes followed by a uniform reallocation of the entire orbital constellation satellites according to the latitude argument, and secondly, due to the placement of GLONASS satellites in the additional orbital planes located between the existing planes. The proposed options for expanding the GLONASS system with standard circular orbits are not inferior in observability to the alternative of complimenting the GLONASS HOSC system, but in contrast to it provide a high observability on a global scale, and not only in the Russian Federation.*

**Keywords:** GLONASS, high-orbital space complex, navigation satellite, geosynchronous elliptic orbit, range, unmodelled accelerations, radiation pressure model, system almanac

### REFERENCES

- [1] Karutin S.N., Mitrikas V.V., Skakun I.O., Yaremchuk V.I. *Kosmonavtika i raketostroenie — Cosmonautics and Rocket Engineering*, 2017, no. 5 (98), pp. 133–139.
- [2] Malyshev V.V., Starkov A.V., Tolstenkov P.S., Fedorov A.V. *Kosmonavtika i raketostroenie — Cosmonautics and Rocket Engineering*, 2017, no. 2 (95), pp. 37–45.
- [3] Mescheryakov V.M., Braginets V.F., Sukhoy Yu.G. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2018, no. 10. DOI: 10.18698/2308-6033-2018-10-1816
- [4] Vatutin S.I. *Raketno-kosmicheskoe priborostroenie i informatsionnye sistemy — Rocket-Space Device Engineering and Information Systems*, 2016, vol. 3, no. 3, pp. 121–287.
- [5] Erokhin G.A., Chernyshev O.V., Kozyrev N.D., Kocherzhevskiy V.G. *Antennofidernye ustroystva i rasprostraneniye radiovoln [Antenna-feeder devices and radio-wave propagation]*. Moscow, Radio i svyaz Publ., 1996, 351 p.

- [6] Bartenev V.A., Krasilshchikova M.N., eds. *Sovremennye i perspektivnye informatsionnye GNSS-tehnologii v zadachakh vysokotochnoy navigatsii* [Modern and perspective GNSS information technologies in the problems of high-precision navigation]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2014, 275 p.
- [7] Grechkoseev A.K., Marareskul T.A. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Priborostroenie — Journal of Instrument Engineering*, 2004, no. 4, pp. 10–14.
- [8] Chuvashov I.N. *Ekologicheskiiy vestnik nauchnykh tsentrov Chernomorskogo ekonomicheskogo sotrudnichestva — Ecological Bulletin of Research Centers of the Black Sea Economic Cooperation*, 2013, no. 3, pp. 145–150.
- [9] Porfirev L.F., Smirnov V.V., Kuznetsov V.I. *Analiticheskie otsenki tochnosti avtonomnykh metodov opredeleniya orbit* [Analytical estimates of the accuracy of autonomous methods for determining orbits]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1987, 279 p.
- [10] Braginets V.F., Mescheryakov V.M., Sukhoy Yu.G. *Kosmonavtika i raketostroenie — Cosmonautics and Rocket Engineering*, 2017, no. 1 (94), pp. 95–102.
- [11] *Federalnaya tselevaya programma «Podderzhanie, razvitie i ispolzovanie sistemy GLONASS na 2012–2020 gody». Prilozhenie № 3* [Federal Target Program “Maintenance, Development and Use of the GLONASS System for 2012–2020”]. Available at: <http://fcp.economy.gov.ru/cgi-bin/cis/fcp.cgi/Fcp/ViewFcp/View/2018/396> (accessed February 7, 2019).
- [12] *Globalnaya navigatsionnaya sputnikovaya sistema GLONASS. Interfeysnyy kontrolnyy dokument. Navigatsionnyy radiosignal v diapazonakh L1, L2 (redaktsiya 5.1)*. [Global navigation satellite system GLONASS. Interface control document. Navigation radio signal in the ranges L1, L2 (version 5.1)]. Moscow, 2008. Available at: [http://russianspacesystems.ru/wp-content/uploads/2016/08/ICD\\_GLONASS\\_rus\\_v5.1.pdf](http://russianspacesystems.ru/wp-content/uploads/2016/08/ICD_GLONASS_rus_v5.1.pdf) (accessed February 7, 2019).

**Mescheryakov V.M.**, Cand. Sc. (Eng.), 1st category Engineer, Precision Navigation and Ballistic Support, Branch of JSC “Research-and-Production Corporation “Precision System and Instruments”. Author of over 20 research publications in the field of space ballistics.

**Braginets V.F.**, Cand. Sc. (Eng.), Head of Department, Chief Designer, Precision Navigation and Ballistic Support, Branch of JSC “Research-and-Production Corporation “Precision System and Instruments”. Author of over 70 research publications in the field of space ballistics. e-mail: [braginets@spnav.ru](mailto:braginets@spnav.ru).

**Sukhoy Yu.G.**, Dr. Sc. (Eng.), Leading Research Scientist, Precision Navigation and Ballistic Support, Branch of JSC “Research-and-Production Corporation “Precision System and Instruments”. Author of over 120 research publications in the field of space ballistics. e-mail: [sukhoy@spnav.ru](mailto:sukhoy@spnav.ru)