DOI: https://doi.org/10.30898/1684-1719.2026.9.4

УДК: 629.783

Исследование вариантов построения низкоорбитального дополнения глобальной навигационной спутниковой системы

А.Б. Спесивцев [1], В.П. Хохлов [1], М.Н. Квасов [2]

[1] Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского,
Россия, Санкт-Петербург
[2] Военный инновационный технополис «ЭРА»,
Россия, Анапа

Статья поступила в редакцию 27 июля 2026 г.

Аннотация. Рассматривается возможность использования низкоорбитального дополнения глобальной навигационной спутниковой системы ГЛОНАСС на основе малых навигационных космических аппаратов. В классе дельта-систем определены варианты и характеристики орбитальных структур, обеспечивающих заданные требования по доступности навигационного поля применительно к углам затенения до 25°. Получены оценки вклада рассмотренных вариантов структур в улучшение характеристик навигационного поля орбитальной группировки ГЛОНАСС.

Ключевые слова: глобальная навигационная спутниковая система, низкоорбитальное дополнение, пространственный геометрический фактор, доступность навигационного поля.

Автор для переписки: Спесивцев Александр Борисович, asp.vka@ro.ru

Введение

Развитие системы ГЛОНАСС как основы навигационного и координатно-временного обеспечения Российской Федерации является важнейшей государственной задачей. Одним из направлений развития системы является обеспечение на конкурентоспособном уровне характеристик точности, доступности и устойчивости навигационного поля (НП), в том числе в сложных условиях (при больших углах затенения, соответствующих городским районам с плотной застройкой и местности со сложным рельефом), а также в условиях нештатного функционирования навигационных космических аппаратов (НКА). Ввиду того, что наиболее существенный вклад в перечисленные характеристики вносит орбитальная группировка (ОГ) системы, то достижение их необходимого уровня может быть обеспечено за счет модификации существующей структуры ОГ или дополнения существующей ОГ навигационными КА на орбитах, отличных от штатных орбит КА системы.

Штатное построение ОГ ГЛОНАСС предполагает 24 НКА, распределенных на трех околокруговых орбитах с наклонением 64,8°±0,3°. Период обращения НКА ГЛОНАСС – 11 часов 15 минут 44±5 секунд, номинальная высота орбит – 19100 км. Особенностью построения ОГ является ее изотрассность, что позволяет уменьшить деградацию структуры за счет влияния нецентральности гравитационного поля Земли. Это обеспечивает устойчивость орбитальных параметров и требует минимальные затраты топлива на поддержание орбитальной структуры.

Результаты ряда проведенных исследований (Г.В. Можаев [1] и др.) показывают, что регулярность в построении ОГ и свойственная для нее повторяемость характеристик НП в определенные интервалы времени могут приводить к появлению на поверхности Земли зон существенного ухудшения точности навигации. Обусловлено это вырождением решения навигационной задачи по одномоментным измерениям в момент, когда все участвующие в решении навигационной задачи НКА располагаются в одной плоскости. Продолжительность таких зон при ограничениях по углу затенения 5° может

достигать 10 минут, максимальные размеры по широте и долготе – до 5°, а увеличение геометрического фактора PDOP может составлять сотни раз. Большие значения минимального угла затенения (до 25°), в том числе вывод из эксплуатации одного, двух и более НКА в этих условиях могут приводить к существенному увеличению размеров и продолжительности зон ухудшения навигации, увеличению геометрического фактора и значительному снижению доступности НП ОГ.

Вопросы улучшения характеристик НП ОГ ГЛОНАСС рассматривались в ряде научных публикаций, например, [2-6]. Авторами предлагаются различные варианты наращивания возможностей существующей ОГ как за счет ее модификации (использования среднеорбитальных НКА), так и развертывания дополнений на основе высокоэллиптических или геосинхронных наклонных НКА. При обосновании дополнений ОГ, как правило, предполагается, что их вклад в систему в первую очередь будет носить региональный характер. Данное обстоятельство заведомо в некоторой мере будет ограничивать конкурентоспособность ОГ ГЛОНАСС по сравнению с развивающимися зарубежными аналогами, в том числе не позволит в полной мере обеспечивать требования по точности навигационных определений отдельных потребителей системы вне пределов региона улучшения НП.

С учетом развития технологий создания и широкого внедрения малых КА в последнее время значительный интерес проявляется к возможности построения низкоорбитального дополнения ОГ ГЛОНАСС на базе малых НКА [6]. В связи с этим исследования по обоснованию вариантов, принципов построения и оцениванию вклада низкоорбитального дополнения в систему ГЛОНАСС с целью улучшения ее характеристик и расширения возможностей являются актуальными.

1. Постановка задачи

Параметры НП системы ГЛОНАСС – доступность, надежность обслуживания, рабочая зона системы, и другие, определены Межгосударственным стандартом – ГОСТ 32454-2013. Так, например, величина рабочей зоны (доступность) системы должна составлять не менее 98 % при следующих условиях и ограничениях: расчет проводится по всем видимым НКА, которые должны обеспечивать значение пространственного геометрического фактора PDOP не более 6, угол места спутника – 5° и более, интервал оценки – 24 часа [7].

Наиболее существенный вклад в перечисленные характеристики вносит архитектура ОГ системы и ее состояние. Применительно к штатной структуре ОГ проведено моделирование и получены оценки основных характеристик НП при углах затенения, превышающих минимальное значение 5° (до 25°). Моделирование проведено с использованием программного комплекса имитационного моделирования (ПК ИМ), структурная схема которого приведена на рисунке 1.

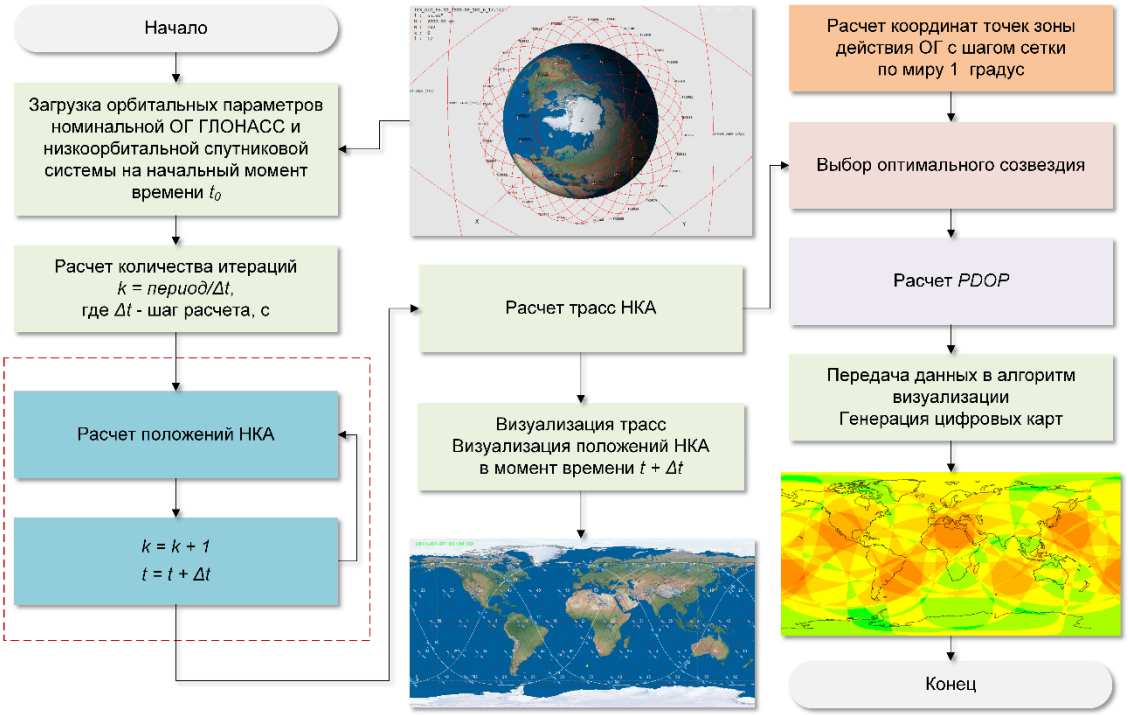
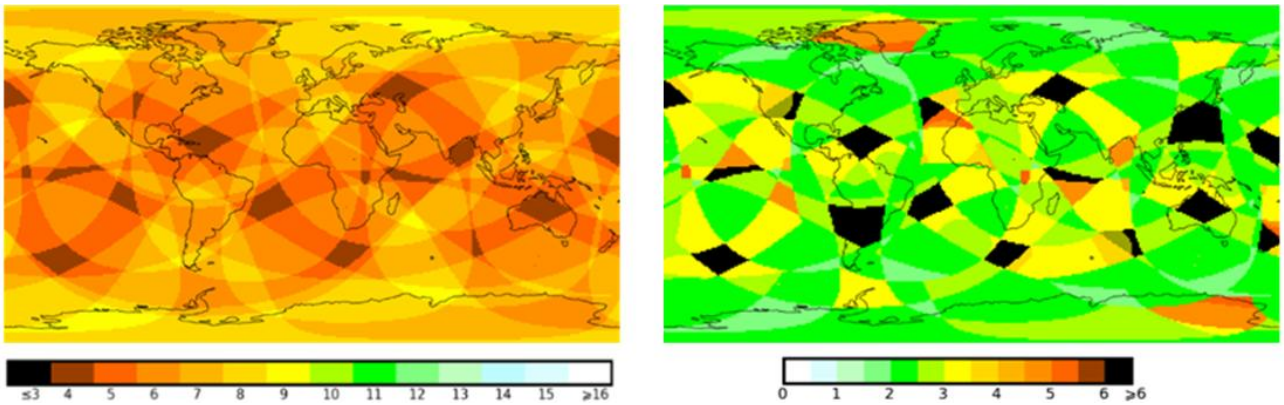


Рис. 1. Структурная схема ПК ИМ.

Исходные данные для моделирования – векторы номинальных параметров движения НКА, находящихся в орбитальных точках ОГ, заданные на начальный момент времени. Расчет начальных параметров осуществлялся по методике, изложенной в [8], моделирование движения и расчет положения НКА осуществлялись по классическим формулам орбитальной механики [9]. По результатам моделирования получены оценки характеристик НП системы для минимальных значений углов затенения 5°, 10°, 15°, 20° и 25°.

В качестве иллюстрации на рисунке 2 в цветовых шкалах ИАЦ КВНО [10] представлены глобальные карты числа видимых НКА (а) и мгновенных значений геометрического фактора PDOP (б), полученные для минимального значения угла затенения 15° на начальный момент времени в границах 24-часового интервала оценки.



а) количество НКА б) мгновенное значение PDOP

Рис. 2. Количество НКА и мгновенное значение PDOP.

Приведенные результаты показывают, что с усложнением пространственной обстановки, характерной для горной местности или условий плотной городской застройки, ошибки навигационных определений по сигналам ОГ ГЛОНАСС значительно возрастают. Проявляется это при существенном затенении навигационных сигналов, когда пригоризонтные НКА, геометрия расположения которых положительно влияет на величину PDOP, из зоны видимости исключены. Данная ситуация в отдельные моменты времени приводит к росту значений PDOP, размеров и продолжительности зон

ухудшения навигации и, как следствие, к снижению глобальной доступности НП ОГ.

Как известно, для осуществления навигационных определений необходима видимость в точке расположения навигационной аппаратуры потребителя (НАП) не менее четырех НКА. Однако, моделирование показывает, что при больших углах затенения в ряде случаев наличие четырех НКА явно недостаточно. На рисунках 3 и 4 в качестве примера показана геометрия расположения четырех НКА относительно НАП для минимального угла затенения 15°, при этом одна пара НКА находится на восходящем участке орбиты, другая пара – на нисходящем. В таблицах 1 и 2 приведены соответствующие значения углов места, наклонных дальностей НКА для указанных точек расположения НАП, а также результирующие значения геометрического фактора.



Рис. 3. Геометрия видимых НКА в точке 50.5° с.ш., 27.5° в.д.



Рис. 4. Геометрия видимых НКА в точке 44.5° ю.ш., 5.5° з.д.

Таблица 1. Видимость НКА в точке с координатами 50.5° с.ш., 27.5° в.д.

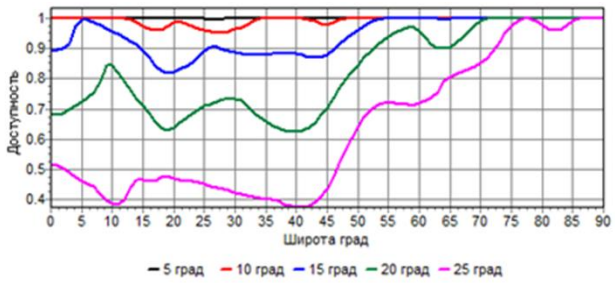
№ орбитальной точки	Угол места, град.	Дальность, км	Геометрический фактор	Значение
1 (↓)	53,27	20082,885	GDOP	297,512
2 (↓)	66,72	19499,465	PDOP	225,296
11 (↑)	62,28	19663,356	HDOP	29,981
12 (↑)	53,82	20054,652	VDOP	223,293

Таблица 2. Видимость НКА в точке с координатами 44.5° ю.ш., 5.5° з.д.

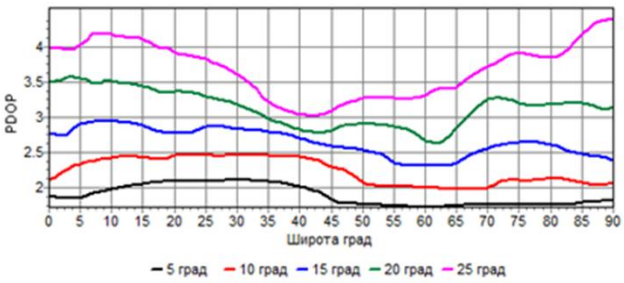
№ орбитальной точки	Угол места, град.	Дальность, км	Геометрический фактор	Значение
13 (↑)	54,96	19994,049	GDOP	139,465
14 (↑)	56,80	19903,255	PDOP	107,238
23 (↓)	57,85	19853,364	HDOP	4,363
24 (↓)	54,23	20030,946	VDOP	107,150

В момент, когда значения наклонных дальностей до НАП становятся сопоставимыми и НКА выстраиваются в одну плоскость, геометрический фактор стремится к максимальным значениям, что может приводить к значительному ухудшению или невозможности решения навигационной задачи в некоторых широтных областях.

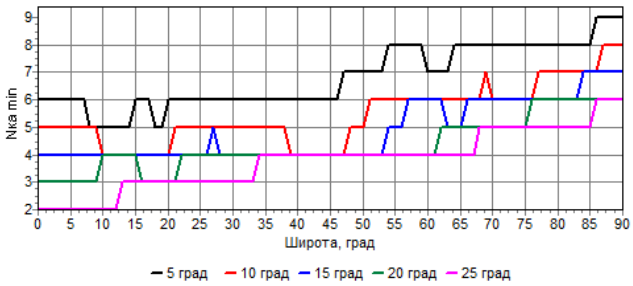
На рисунке 5 представлены зависимости осредненных на суточном временном интервале по долготе значений доступности (а) и среднего PDOP (б), а также минимального количества доступных НКА (в) от широты положения потребителя. Значения доступности и среднего значения PDOP получены по условию PDOP ≤ 6 для значений минимальных углов затенения 5°, 10°, 15°, 20° и 25°.



а) доступность



б) среднее значение PDOP



в) минимальное количество доступных НКА

Рис. 5. Навигационные характеристики ОГ ГЛОНАСС.

Из приведенных зависимостей следует, что значительное ухудшение условий для решения навигационной задачи наступает при углах затенения, превышающих значение 15° (рисунок 5а). Данное обстоятельство связано с ослаблением геометрии расположения НКА и уменьшением их количества по мере уменьшения географической широты положения потребителя (рисунок 5в). Так, при значении угла затенения 15° количество доступных НКА не менее четырех имеет место для широт более 55°, при углах затенения 20° и 25° – для широт более 60° и 65° соответственно. На широтах менее 25° и 35° при углах затенения 20° и 25°, соответственно, количество доступных НКА может быть меньше четырех (три или два), что в таких случаях исключает возможность решения навигационной задачи и приводит к ухудшению характеристик НП в целом. Подтверждением тому являются полученные максимальные значения PDOP. Оценки значений доступности, среднего геометрического фактора PDOP, а также значения максимального PDOP (Г – глобальное значение, Р – территория РФ) приведены в таблице 3.

Таблица 3. Навигационные характеристики ОГ ГЛОНАСС.

Показатель	Регион	Угол затенения, град				
		5	10	15	20	25
Доступность по условию PDOP ≤ 6	Г	0,9999	0,992	0,943	0,822	0,629
	Р	1	1	0,996	0,959	0,846
Среднее значение PDOP (по условию PDOP ≤ 6)	Г	1,891	2,239	2,658	3,141	3,703
	Р	1,761	2,046	2,476	3,009	3,645
Максимальное значение PDOP	Г	42,38	> 1000	> 1000	> 1000	> 1000
	Р	2,36	5,19	> 1000	> 1000	> 1000

Обобщенный анализ результатов моделирования указывает на то, что в качестве одной из основных причин ухудшения характеристик следует рассматривать недостаточное количество доступных НКА для решения навигационной задачи в сложных условиях. Устранение данной причины возможно как за счет модификации существующей структуры ОГ (размещения в структуре дополнительных НКА), так и за счет развертывания орбитального дополнения ОГ системы. Рассмотрим возможность улучшения характеристик НП системы ГЛОНАСС за счет использования низкоорбитального дополнения (далее – НСС, низкоорбитальная спутниковая система). В общем случае решение данной задачи предполагает определение орбитальной структуры НСС и оценивания ее вклада в характеристики НП.

Для построения НСС будет рассмотрен класс дельта-систем [11] (аналогичный построению системы ГЛОНАСС) с равномерным расположением плоскостей орбит на дуге 0-360°. Орбитальная структура, заданная в классе дельта-систем, имеет вид:

$$i{:}T/P/F_{360^\circ}, \quad (1)$$

где i – наклонение орбиты; T – общее количество КА в системе; P – количество плоскостей в системе; F – коэффициент расфазировки движения КА в соседних плоскостях, где $F = 0…P–1$; 360° – длина дуги.

Дельта-системы данного вида являются подклассом кинематически правильных систем с группами симметрии первого типа. Начальная фазовая структура дельта-системы определяется по следующему алгоритму:

$$\Omega = \Omega_1 + \frac{2\pi(j-1)}{P}; \tag{2}$$

$$u = u_1 + \frac{2\pi}{T}\{F(j-1) + P(l-1)\},$$

где j – номер орбитальной плоскости ($j = 1…P$); l – номер КА в плоскости ($l = 1…T/P$).

В качестве показателя результативности и оценивания вклада орбитальной структуры НСС в характеристики системы ГЛОНАСС будет рассматриваться характеристика доступности НП по условию PDOP ≤ 6 для заданного значения минимального угла затенения. Выбор наилучшей орбитальной структуры НСС будет осуществляться из условия обеспечения доступности НП не ниже заданного значения при минимальном количестве НКА в структуре.

2. Результаты моделирования

Методика выбора структуры НСС включает в себя: решение задачи определения орбитальных структур глобального непрерывного покрытия при заданных ограничениях по углу затенения [12], оценивание характеристики доступности НП системы ГЛОНАСС+НСС [8], выбор наилучшей структуры НСС, обеспечивающей заданные ограничения при минимальном количестве НКА в ее составе.

Исходные данные номинальной ОГ ГЛОНАСС:

– количество доступных НКА: 24;

– векторы номинальных параметров движения НКА, заданные на начальный момент времени.

Исходные данные НСС:

– тип орбит: круговые;

– высота орбиты: 1500 км;

– диапазон наклонений орбиты: 65°… 90°.

Исходные данные проведения расчетов:

– минимальное значение угла затенения: 5°, 10°, 15°, 20°, 25°;

– заданное значение доступности НП: не ниже 0,98;

– интервал оценки: один драконический период НКА (674 минуты);

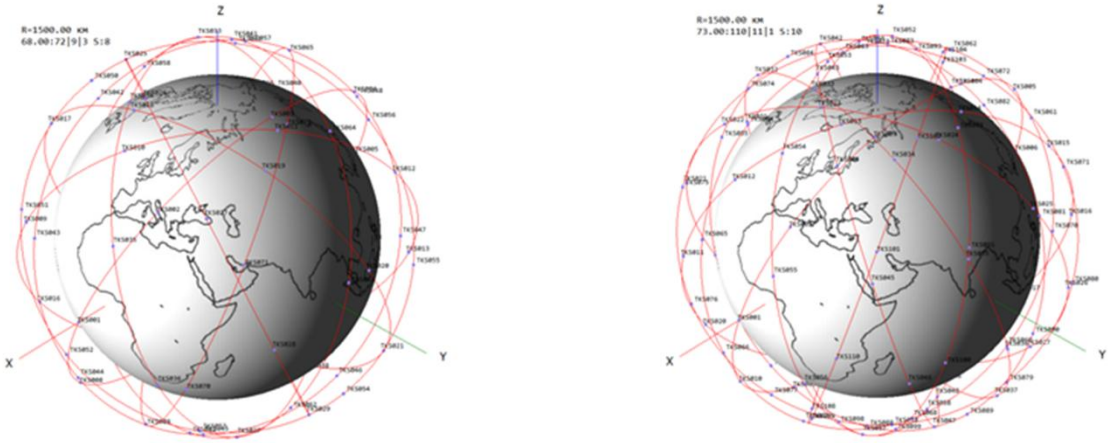
– шаг расчета по времени: 60 с;

– шаг равномерной аналитической сетки по миру: 1°;

– количество точек зоны действия ОГ: 64800 (по всему миру);

– регион РФ: по широте 50°…90° с.ш., по долготе 30°…170° в.д.

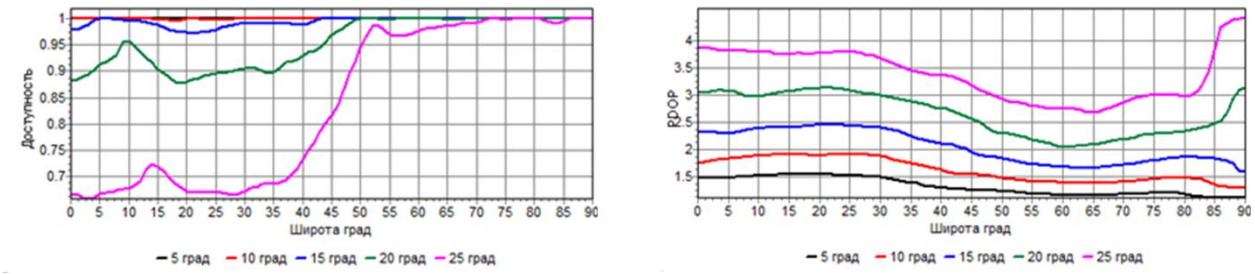
По результатам решения задачи выбора НСС определены два варианта орбитальных структур, обеспечивающих выполнение требований по заданному значению доступности НП минимальным количеством НКА: $68°:72/9/3_{360°}$ для угла затенения 15° и $73°:110/11/1_{360°}$ для угла затенения 20°. Геометрия полученных орбитальных структур приведена на рисунке 6.



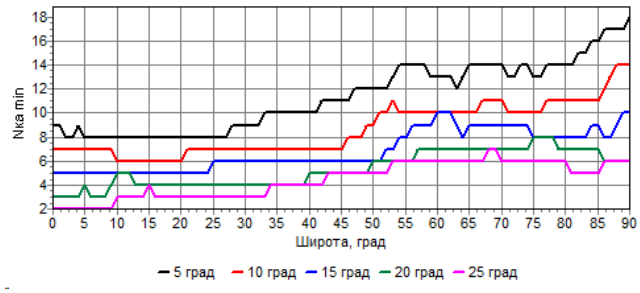
а) $68°:72/9/3_{360°}$ б) $73°:110/11/1_{360°}$

Рис. 6. Геометрии дельта-систем НСС.

Полученные для двух систем ГЛОНАСС+НСС зависимости осредненных по долготе значений доступности и среднего PDOP, а также минимального количества доступных НКА от широты положения потребителя приведены, соответственно, на рисунках 7 и 8.

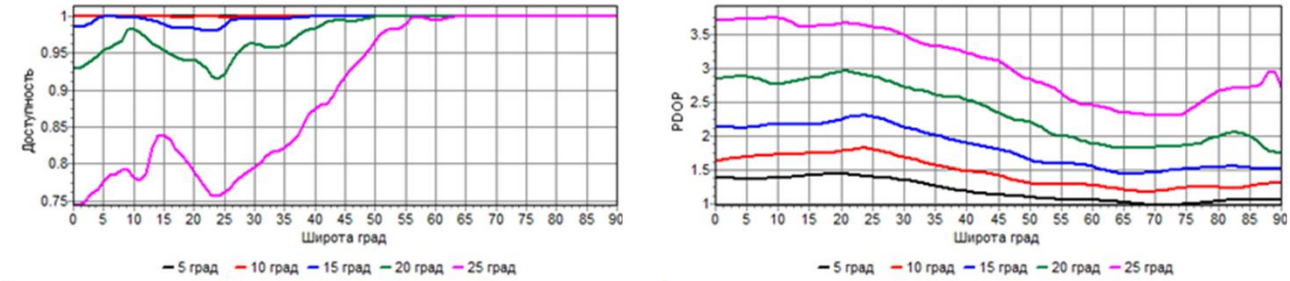


а) доступность б) средний PDOP

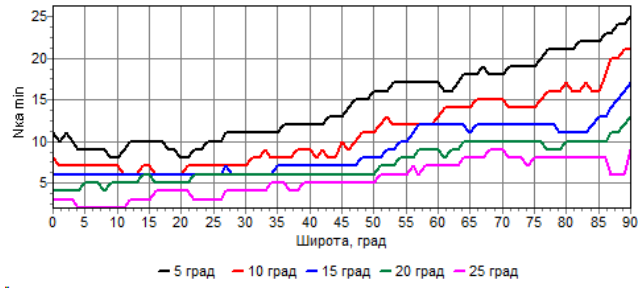


в) минимальное количество НКА

Рис. 7. Характеристики ГЛОНАСС+НСС (68°:72/9/$3_{360°}$).



а) доступность б) средний PDOP



в) минимальное количество НКА

Рис. 8. Характеристики ГЛОНАСС+НСС (73°:110/11/$1_{360°}$).

Оценки характеристик НП систем ГЛОНАСС+НСС для заданных минимальных углов затенения приведены в таблицах 4 и 5.

Таблица 4. Характеристики НП ГЛОНАСС+НСС ($68°:72/9/3_{360°}$).

Характеристика	Регион	Угол затенения, град				
		5	10	15	20	25
Доступность по условию PDOP ≤ 6	Г	1	0,999	0,994	0,954	0,834
	Р	1	1	1	0,999	0,988
Среднее значение PDOP (по условию PDOP ≤ 6)	Г	1,329	1,626	2,054	2,656	3,383
	Р	1,177	1,414	1,754	2,303	3,085
Максимальное значение PDOP	Г	3,83	14,16	96,07	> 1000	> 1000
	Р	1,78	2,62	4,43	7,63	501,3

Таблица 5. Характеристики НП ГЛОНАСС+НСС ($73°:110/11/1_{360°}$).

Характеристика	Регион	Угол затенения, град				
		5	10	15	20	25
Доступность по условию PDOP ≤ 6	Г	1	0,999	0,997	0,978	0,898
	Р	1	1	1	1	0,996
Среднее значение PDOP (по условию PDOP ≤ 6)	Г	1,205	1,47	1,843	2,366	3,071
	Р	1,050	1,261	1,536	1,924	2,546
Максимальное значение PDOP	Г	3,01	16,95	109,03	123,59	> 1000
	Р	1,53	2,28	3,39	5,65	212,1

Сравнительный анализ полученных результатов для систем ГЛОНАСС (рисунок 5 и таблица 3) и ГЛОНАСС+НСС (рисунки 7-8, таблицы 4-5) показывает, что орбитальная структура $68°:72/9/3_{360°}$ по своим характеристикам обеспечивает однократное глобальное непрерывное покрытие, структура $73°:110/11/1_{360°}$ – двукратное для заданных при их определении значений углов затенения. В результате для всего диапазона широт положения потребителя каждая из орбитальных структур при заданных значениях углов затенения (15° и 20°) позволяет обеспечить количество доступных НКА не менее пяти, что улучшает геометрию расположения НКА и приводит к повышению доступности и точностных характеристик НП.

Необходимо отметить, что орбитальная структура НСС, обеспечивающая выполнение заданного требования по доступности при минимальном угле затенения 25°, при проведении исследований не рассматривалась. Предварительные расчеты показали, что такие требования в классе рассматриваемых орбитальных систем может обеспечить структура трехкратного глобального непрерывного покрытия, включающая в свой состав не менее 200 НКА.

Результаты оценивания вклада рассмотренных НСС в улучшение характеристик НП ОГ ГЛОНАСС приведены в таблице 6.

Таблица 6. Оценки вклада НСС в улучшение НП ОГ ГЛОНАСС.

Характеристика	Регион	Угол затенения, град				
		5	10	**15**	**20**	25
ГЛОНАСС+НСС ($68°:72/9/3_{360°}$)						
Увеличение доступности по условию PDOP ≤ 6,%	Г	0,01	0,71	**5,41**	16,06	32,59
	Р	0,00	0,00	**0,40**	4,17	16,78
Уменьшение среднего значения PDOP (по условию PDOP ≤ 6),%	Г	29,72	27,38	**22,72**	15,44	8,64
	Р	33,16	30,89	**29,16**	23,46	15,36
ГЛОНАСС+НСС ($73°:110/11/1_{360°}$)						
Увеличение доступности по условию PDOP ≤ 6,%	Г	0,01	0,71	5,73	**18,98**	42,77
	Р	0,00	0,00	0,40	**4,28**	17,73
Уменьшение среднего значения PDOP (по условию PDOP ≤ 6),%	Г	36,2	34,3	30,6	**24,6**	17,0
	Р	40,3	38,37	37,96	**36,06**	30,15

Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод, что низкоорбитальное дополнение позволяет в значительной мере улучшить характеристики НП номинальной ОГ системы ГЛОНАСС. В частности, в зависимости от предъявляемых требований к минимальному углу затенения, рассмотренные орбитальные структуры НСС могут обеспечить:

– при нормальных условиях (угол затенения 5°) уменьшение глобального среднего значения PDOP на 30 % и 36 %, регионального среднего значения (РФ) – на 33 % и 40 % соответственно;

– при минимальном угле затенения 15° (НСС 68°:72/9/$3_{360°}$) увеличение глобальной доступности на 5 %, уменьшение глобального среднего значения PDOP на 22 %, регионального среднего значения (РФ) – на 29 %; при угле затенения 25° – увеличение глобальной доступности на 32 %, регионального среднего значения (РФ) – на 16 %, уменьшение глобального среднего значения PDOP – на 8 %, регионального среднего значения (РФ) – на 15 %;

– при минимальном угле затенения 20° (73°:110/11/$1_{360°}$) увеличение глобальной доступности на 19 %, регионального среднего значения (РФ) – на 4 %, уменьшение глобального среднего значения PDOP – на 24 %, регионального среднего значения (РФ) – на 36 %; при угле затенения 25° – увеличение глобальной доступности на 42 %, регионального среднего значения (РФ) – на 17 %, уменьшение глобального среднего значения PDOP – на 30 %, регионального среднего значения (РФ) – на 15 %.

Заключение

Наиболее существенный вклад в характеристики доступности и точности навигационного поля системы ГЛОНАСС вносит структура орбитальной группировки. Одним из направлений достижения возрастающих требований к характеристикам навигационного поля системы может быть дополнение существующей ОГ навигационными КА на орбитах, отличных от штатных орбит КА системы. С учетом развития технологий создания и широкого внедрения малых КА в последнее время значительный интерес проявляется к возможности построения низкоорбитального дополнения ОГ ГЛОНАСС на базе малых НКА.

В рамках проведенных исследований определены варианты орбитальных структур низкоорбитального дополнения ОГ системы ГЛОНАСС для улучшения ее характеристик применительно к сложным условиям (при больших углах

затенения, соответствующих городским районам с плотной застройкой и местности со сложным рельефом).

Полученные оценки вклада вариантов орбитальных структур показывают возможность улучшения характеристик ОГ ГЛОНАСС как применительно к нормальным (угол затенения 5°), так и сложным (угол затенения до 25°) условиям решения навигационной задачи. Результаты исследований могут быть использованы в качестве исходных при проектировании и проведении сравнительного анализа вариантов низкоорбитальных дополнений ОГ ГЛОНАСС.

Литература

1. Г.В. Можаев. Синтез орбитальных структур спутниковых систем (теоретико-групповой подход). – Москва, Машиностроение, 1989. 304 с.
2. Ватутин С.И. Оценка геометрического фактора для наземного потребителя системы ГЛОНАСС с высокоэллиптическим дополнением // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы, 2016, том 3, выпуск 3.
3. Ватутин С.И., Бирюков А.А., Курков И.К. Сравнительный анализ глобальных дополнений системы ГЛОНАСС // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы, 2017, том 4, выпуск 4.
4. Мещеряков В.М., Брагинец В.Ф., Сухой Ю.Г. Анализ особенностей технической реализации дополняющего высокоорбитального космического комплекса системы ГЛОНАСС // Инженерный журнал: наука и инновации, 2019, выпуск 2.
5. Топорков А.Г. Повышение точности и доступности системы ГЛОНАСС для гражданских потребителей за счет высокоорбитального космического комплекса // Инженерный журнал: наука и инновации, 2023, выпуск 7.
6. Леонидов Н.В., Митина М.В. Образ низкоорбитального дополнения к орбитальной группировке системы ГЛОНАСС // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2021, № 2.

7. ГОСТ 32454-2013. Глобальная навигационная спутниковая система. Параметры радионавигационного поля. Технические требования и методы испытаний. – М.: Стандартинформ, 2014. – 19 с.
8. Глобальная навигационная спутниковая система ГЛОНАСС. Интерфейсный контрольный документ (редакция 5.1). – М., 2008. С.49-50.
9. Справочное руководство по небесной механике и астродинамике. Под ред. Г.Н. Дубошина. – М: Наука, 1976. – 864 с.С. 221-225.
10. Оценка технических характеристик ГЛОНАСС. – URL: https://glonass-iac.ru/glonass/technical/ (дата обращения 25.07.2025).
11. Walker J.G. Satellite Constellations // Journal of the British Interplanetary Society, 1984, vol. 24, pp. 369–384.
12. Власов С.А., Мамон П.А. Теория полетов космических аппаратов. – СПб: Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, 2007. – 435 с. с ил.

Для цитирования:

Спесивцев А.Б., Хохлов В.П., Квасов М.Н. Исследование вариантов построения низкоорбитального дополнения глобальной навигационной спутниковой системы // Журнал радиоэлектроники. – 2026. – №. 9. https://doi.org/10.30898/1684-1719.2026.9.4