

АНАЛИЗ ВАРИАНТОВ МОДЕРНИЗАЦИИ СТРУКТУРЫ ОРБИТАЛЬНОЙ ГРУППИРОВКИ СИСТЕМЫ ГЛОНАСС ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЕЁ КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТИ

И. И. Шилко¹, Ю. Б. Волошко¹, О. В. Ружилова¹,
О. А. Анисимова^{1, 2} ✉

¹АО «Информационные спутниковые системы» им. акад. М. Ф. Решетнёва»,
г. Железногорск, Красноярский край, Российская Федерация

²Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Российская Федерация

Осуществлён синтез возможных вариантов модернизации орбитальной группировки глобальной навигационной спутниковой системы ГЛОНАСС исходя из следующих принципов модернизации: увеличение числа космических аппаратов (КА) с сохранением трёхплоскостной структуры и изменением высоты и наклона орбит; увеличение числа КА с сохранением параметров орбит; увеличение числа КА с введением 3-х дополнительных плоскостей для размещения в них антиподных космических аппаратов (дополнительные плоскости располагаются между основными).

Проведено моделирование характеристик навигационного поля вариантов синтезированных орбитальных группировок: базовая орбитальная группировка из 24 КА с их равномерным размещением в 3-х плоскостях (ГЛОНАСС-24); из 27 КА с их равномерным размещением в 3-х плоскостях; из 30 КА с их равномерным размещением в 3-х плоскостях; из 30 КА на базе ГЛОНАСС-24, где в каждую плоскость добавлено по 2 антиподных КА; из 30 КА на базе ГЛОНАСС-24 с организацией дополнительных трёх плоскостей, в которые добавлено по 2 КА; из 30 КА, равномерно размещённых в 6-ти плоскостях; из 36 КА, равномерно размещённых в 3-х плоскостях; из 36 КА на базе ГЛОНАСС-24, в которой между штатными плоскостями добавлены 3 дополнительные плоскости, в которые добавлено по 4 КА; из 36 КА на базе ГЛОНАСС-24, где в каждую штатную плоскость добавлено по 4 КА; из 36 КА на базе ГЛОНАСС-24, в которой в каждую штатную плоскость добавлено по 2 антиподных КА и в 3-х дополнительных плоскостях добавлено по 2 антиподных КА.

На основании проведённого анализа характеристик навигационного поля отдано предпочтение варианту шестиплоскостной орбитальной группировки из 30 КА, построенной на базе ГЛОНАСС-24 с организацией дополнительных трёх плоскостей.

Ключевые слова: орбитальная группировка, космический аппарат, ГЛОНАСС, параметры орбиты, структура орбитальной группировки.

Введение

Для обеспечения конкурентоспособного уровня отечественная система ГЛОНАСС должна иметь тактико-технические характеристики (ТТХ) по точности, доступности и устойчивости радионавигационного поля, как минимум, на одном уровне с зарубежными аналогами. При этом достигнуть паритета с GPS необходимо в ближайшей перспективе на основе КА следующего поколения «ГЛОНАСС-К». Их использование определит ос-

новные характеристики отечественного координатно-временного и навигационного обеспечения до 2030 года [1–3].

Рост потребностей в навигационных услугах в мире идёт семимильными шагами, а это означает, что такими же темпами должны развиваться средства и технологии самих навигационных систем. Дальнейшее развитие системы ГЛОНАСС должно происходить с учётом двух определяющих это развитие факторов.

Первым из них является необходимость перманентного обеспечения требований существующих и перспективных потребителей различного типа. Причём не только требования к навигации потребителей в обычных условиях (на открытой

✉ anisimovaoa@iss-reshetnev.ru

© Шилко И. И., Волошко Ю. Б., Ружилова О. В., Анисимова О. А., 2019

местности), но и в условиях сложного рельефа местности и городской застройки в мегаполисах.

Другим фактором, который необходимо принимать во внимание при формировании направлений развития ГЛОНАСС, являются направления и уровень развития глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС) за рубежом [4–8].

Основным конкурентом системы ГЛОНАСС является американская GPS, орбитальная группировка (ОГ) которой состоит из 32 КА. Интенсивно развиваются европейская ГНСС Galileo и китайская BeiDou, которые, в соответствии с планами их развития, к 2020 году будут полностью развернуты, и иметь в составе своих ОГ по 30 и 35 КА соответственно.

В связи с этим при формировании нового облика системы ГЛОНАСС необходимо учитывать, что без модернизации структуры ОГ ГЛОНАСС её характеристики будут существенно уступать аналогичным характеристикам трёх зарубежных ГНСС.

Таблица 1

Параметры орбиты ГНСС ГЛОНАСС/GPS/Galileo/BeiDou [9, 10]

Количество штатных КА	24/32/27/27
Высота орбиты, км	19400/20200/23222/21528
Количество плоскостей	3/6/3/3
Наклонение	64,8°/54,8°/56°/57°

Синтез возможных вариантов модернизации ОГ ГЛОНАСС

Модернизация существующей ОГ ГЛОНАСС может осуществляться путём [6, 7, 11, 12]:

- увеличения числа КА с сохранением трёхплоскостной структуры и изменением высоты и наклонения орбит;
- увеличения числа КА с сохранением трёхплоскостной структуры и параметров орбит;
- увеличения числа КА с введением 3-х дополнительных плоскостей для размещения в них антиподных КА. Дополнительные плоскости располагаются между основными.

Модернизированные орбитальные группировки из 27 КА

Первое, наиболее действенное, направление связано с увеличением числа спутников в системе до 27 с возможными вариантами:

- изменения параметров ОГ (переход на более высокие орбиты с большой полуосью,

$a = 27594$ км, повторяемостью трассы – 17/9, периодом 12 ч 40 мин и понижением наклонения до 57°);

- сохранения параметров существующей ОГ (небольшое поднятие высоты орбит для сохранения изотрасности).

В первом варианте характеристики навигационных услуг будут практически совпадать с характеристиками Galileo (имеет место слабая широтная асимметрия за счёт отличий наклонений, но несколько лучшее, чем в Galileo, качество навигации в приполярных регионах).

Во втором варианте формируется ОГ из 27 КА по 9 КА в каждой плоскости с высотой на 100 км выше штатной ($T = 40811$ с, $a = 25620$ км, повторяемость трассы – 19/9).

В табл. 2 приводятся навигационные характеристики для этих 2-х вариантов: ОГ ГЛОНАСС из 27 КА с параметрами орбит, близкими к номинальным, ОГ ГЛОНАСС-27* модернизированная ($a = 27730$ км, $i = 57^\circ$); и ОГ Galileo ($a = 29600$ км, $i = 57^\circ$), также состоящая из 27 КА.

Наиболее приемлемый вариант модернизации ОГ системы ГЛОНАСС (ОГ из 27 КА с сохранением её наклонения, но изменением высоты на ~100 км) для своей реализации потребует:

- перестройки орбитальной группировки (перевод функционирующих КА в новые системные точки) и вывод её из целевого использования на длительное время (0,5 года);
- изменения программно-методической документации по управлению КА из-за изменения изотрасности (вместо 8 суток будет 9 суток).

Для обеспечения работы в системе ГЛОНАСС с ОГ из 27 КА как существующего, так и создаваемого парка потребителей также необходимо разработать новый суперкадр для передаваемой с КА ГЛОНАСС навигационной информации по дополнительным 3 КА, провести доработку бортовой навигационной аппаратуры КА, средств НКУ ГЛОНАСС, согласовать радиочастотную заявку на дополнительные литеры частот.

Модернизированные орбитальные группировки из 30 КА

Изотрасные варианты ОГ, состоящие из 30 КА, требуют повышения высоты орбиты ОГ ГЛОНАСС на 200 км. Такая ОГ имеет большую полуось a , равную 25710 км, повторяемостью трассы – 21/10, драконический период – 41026 с. Такая ОГ является трёхплоскостной, в каждой плоскости находится по 10 равномерно распределённых КА, наклонение их орбит $64,8^\circ$. Навигационные характеристики этой ОГ практически совпадают с характеристиками ОГ-30 (неизотрасная), и несколько лучше, чем у Galileo из 27 КА. В табл. 3 приведены навигационные характеристики этих 3-х ОГ.

Таблица 2

Навигационные характеристики 2-х вариантов ОГ ГЛОНАСС-27 и ОГ Galileo-27

	ОГ ГЛОНАСС-27 Г/Р	ОГ ГЛОНАСС-27* Г/Р	ОГ Galileo-27 Г/Р
Среднее значение пространственного геометрического фактора PDOP для угла места 5°	1,78/1,62	1,74/1,67	1,71/1,68
Доступность по условию $PDOP \leq 6$ на открытой местности с ограничениями по углу места 5°	1/1	1/1	1/1
Доступность повышенной точности по условию $PDOP \leq 2$ на открытой местности с ограничениями по углу места 5°	0,801/0,894	0,842/0,880	0,872/0,883
Доступность по условию $PDOP \leq 6$ в городской и горной местности с ограничениями по углу места 25°	0,725/0,877	0,804/0,815	0,852/0,807

Примечание: Г – глобальная зона обслуживания, Р – зона обслуживания территории Российской Федерации.

Таблица 3

Навигационные характеристики ОГ ГЛОНАСС из 30 КА и ОГ Galileo

	ОГ-30 $a = 25509$ км Г/Р	ОГ-30 $a = 25710$ км Г/Р	ОГ Galileo-27 Г/Р
Среднее значение пространственного геометрического фактора PDOP для угла места 5°	1,66/1,51	1,66/1,51	1,71/1,68
Доступность по условию $PDOP \leq 6$ на открытой местности с ограничениями по углу места 5° (%)	1/1	1/1	1/1
Доступность повышенной точности по условию $PDOP \leq 2$ на открытой местности с ограничениями по углу места 5° (%)	0,912/0,991	0,916/0,992	0,872/0,883
Доступность по условию $PDOP \leq 6$ в городской и горной местности с ограничениями по углу места 25° (%)	0,876/0,970	0,880/0,972	0,852/0,807

Рассмотренные в данном разделе ОГ из 30 КА дают существенный эффект в улучшении навигационных характеристик. При их формировании практически не должны возникать проблемы с запасами топлива на модернизацию.

Однако эти варианты создают определённые риски при формировании ОГ (несрабатывание одной из двигательных установок не позволит добиться нужного результата) и, кроме того, переходный процесс для них длительный по времени и ухудшает характеристики радионавигационных полей (РНП).

Модернизация структуры ОГ на основе добавления КА в существующие плоскости ОГ ГЛОНАСС без модификации существующих слотов штатной ОГ

Ещё одно направление модификации ОГ ГНСС ГЛОНАСС это добавление КА в существующие три плоскости ОГ ГЛОНАСС без модификации слотов штатной ОГ. Ниже приводится орбитальная группировка системы ГЛОНАСС, состоящая из 30 аппаратов: 24-х штатных и 6 дополнительных.

Основной вариант (ОГ-30Б) – в штатную группировку ГЛОНАСС-24 добавляются 6 спут-

ников: по 2 в каждую плоскость, расположение спутников антиподное. Значения аргументов широт для этого варианта приведены в табл. 4.

Таблица 4

Аргументы широты спутников группировки ГЛОНАСС ОГ-30Б

Номер спутника в плоскости	Плоскость 1	Плоскость 2	Плоскость 3
1	0	15	30
2	-22,5	-30	-15
3	-45	-52,5	-60
4	-90	-75	-82,5
5	-135	-120	-105
6	-180	-165	-150
7	-202,5	-210	-195
8	-225	-232,5	-240
9	-270	-255	-262,5
10	-315	-300	-285

Примечание: жирным шрифтом выделены те спутники, которые добавлены в номинальную 24-х спутниковую группировку ГЛОНАСС.

Модернизация ОГ ГЛОНАСС на основе введения дополнительных плоскостей

Группировка ГЛОНАСС использует 6 плоскостей: в штатную группировку добавляются 3 дополнительные плоскости, в каждой из которых находятся по 2 антиподных спутника. Дополнительные плоскости расположены между основными (ОГ-30А). Такой вариант можно использовать как промежуточный для дальнейшей трансформации орбитальной группировки ГЛОНАСС: 18 спутников в основных 3-х плоскостях и 12 в дополнительных плоскостях. Значения аргументов широты и долготы восходящих узлов для ОГ-30А приведены в табл. 5.

Все остальные параметры: наклонение орбиты, долгота восходящего узла, высота орбиты, эксцентриситет (орбиты круговые) – соответствуют номинальным параметрам системы ГЛОНАСС. Отметим, что ОГ-30А из табл. 5 является однострассовой.

Далее в табл. 6 приводятся навигационные характеристики всех приведённых выше вариантов модернизации ОГ из 30 КА.

Анализ рассмотренных вариантов показывает, что вариант модернизации ОГ системы ГЛОНАСС с использованием равномерного расположения спутников в пространстве ОГ-30 обладает наилучшими характеристиками для обеспечения глобальной навигации. Однако он требует перемещения спутников в новые орбитальные позиции, что неприемлемо.

Таблица 5

Аргументы широты спутников группировки ГЛОНАСС ОГ-30А

Номер спутника в плоскости	$\Omega = 0^\circ$	$\Omega = 60^\circ$	$\Omega = 120^\circ$	$\Omega = 180^\circ$	$\Omega = 240^\circ$	$\Omega = 300^\circ$
1	0		15		30	
2	-45	-37,5	-30		-15	
3	-90		-75	-67,5	-60	
4	-135		-120		-105	-52,5
5	-180		-165		-150	
6	-225	-217,6	-210		-195	
7	-270		-255	-247,5	-240	
8	-315		-300		-285	-232,5

Таблица 6

Навигационные характеристики ОГ из 30 КА

	ГЛОНАСС-24 Г/Р	ОГ-30 Г/Р	ОГ-30А Г/Р	ОГ-30Б Г/Р	ОГ-30 (6×5) Г/Р
Среднее значение пространственного геометрического фактора PDOP для угла места 5°	1,94/1,74	1,66/1,51	1,67/1,54	1,72/1,56	1,61/1,55
Доступность по условию $PDOP \leq 6$ на открытой местности с ограничениями по углу места 5°	0,99991/1	1/1	1/1	1/1	1/1
Доступность повышенной точности по условию $PDOP \leq 2$ на открытой местности с ограничениями по углу места 5°	0,614/0,842	0,912/0,991	0,87/0,965	0,836/0,983	0,936/0,973
Доступность по условию $PDOP \leq 6$ в городской и горной местности с ограничениями по углу места 25°	0,492/0,786	0,876/0,97	0,710/0,89	0,730/0,93	0,772/0,964

Варианты дальнейшего развития ОГ ГЛОНАСС до 36 КА

Дальнейшее развитие ОГ с учётом доведения числа КА в ОГ до 36 позволяет рассмотреть, по аналогии с ОГ из 30 КА, следующие варианты построения:

- ОГ-36: ОГ из 36 КА, равномерно распределённых по 3-м плоскостям;
- ОГ-36А: ОГ из 36 КА, распределённых в 6 плоскостях – 3 плоскости по 8 КА плюс 3 пло-

скости по 4 КА (ОГ-30А плюс 2 антиподных дополнительных КА в каждой плоскости);

- ОГ-36Б: ОГ из 36 КА в трёх плоскостях – ОГ-30Б, дополненная 6 КА по 2 дополнительных антиподных КА в каждой плоскости ОГ-30Б;

- ОГ-36С: ОГ из 36 КА в шести плоскостях – ОГ на базе ОГ ГЛОНАСС-24, в которой в каждую штатную плоскость добавлено по 2 антиподных КА, и в 3-х дополнительных плоскостях добавлено по 2 антиподных КА (такая ОГ является совмещённым вариантом ОГ-30А и ОГ-30В).

Таблица 7

Навигационные характеристики ОГ-36, ОГ-36А, ОГ-36Б, ОГ-36С

	ОГ-36 Г/Р	ОГ-36А Г/Р	ОГ-36Б Г/Р	ОГ-36С Г/Р
Среднее значение пространственного геометрического фактора PDOP для угла места 5°	1,49/1,35	1,47/1,38	1,54/1,41	1,52/1,46
Доступность по условию PDOP ≤ 6 на открытой местности с ограничениями по углу места 5° (%)	1/1	1/1	1/1	1/1
Доступность повышенной точности по условию PDOP ≤ 2 на открытой местности с ограничениями по углу места 5° (%)	0,960/1	0,971/1	0,953/0,99995	0,951/0,990
Доступность по условию PDOP ≤ 6 в городской и горной местности с ограничениями по углу места 25° (%)	0,956/1	0,846/0,938	0,900/0,985	0,831/0,923

Как и в случае ОГ из 30 КА при доведении численности КА до 36 наилучшим вариантом из этого класса ОГ является равномерная ОГ-36.

Анализ вариантов модернизации структуры орбитальной группировки системы ГЛОНАСС для обеспечения её конкурентоспособности

Целью модернизации ОГ ГЛОНАСС является доведение её характеристик до конкурентоспособного уровня.

Приведённая классификация вариантов модернизации ОГ и рассмотрение их характеристик, достоинств, недостатков и методов создания показало следующее:

1. Для доведения ТТХ ГЛОНАСС по точности и доступности до конкурентоспособного уровня, в том числе для компенсации зон ухудшения точности, существуют различные классы орбит и методы их построения, к основным из которых относятся:

- реконфигурация (реконструкция) штатной ОГ, заключающаяся в более или менее существен-

ном изменении параметров существующей ОГ ГЛОНАСС;

- добавление к штатной ОГ дополнительных орбитальных сегментов, сохраняя при этом штатную ОГ ГЛОНАСС;

- создание новой ОГ параллельно с существующей ОГ на новых плоскостях с постепенным включением запускаемых КА в целевое использование.

2. При выборе класса орбит и методов их построения необходимо учесть существующие ограничения на модернизацию ОГ ГЛОНАСС, к которым относятся: ограничения на число лите-ров, имеющиеся затраты топлива КА, требования к процессу модернизации по времени и ТТХ РНП при его проведении, возможность обеспечения построения и функционирования новой ОГ за счёт утверждённой программы запусков, используемых средств выведения, наземного комплекса управления. Необходимо отметить, что при любой модернизации ОГ необходима модернизация и развитие навигационных кадров.

3. Классы ОГ, получаемые на основе повышения высоты орбит КА, включая функционирую-

щие КА, не целесообразны. Это связано с тем, что они требуют изменения параметров орбит с помощью изменения программы запусков и реконфигурации существующей ОГ, что требует больших затрат топлива и времени на реконфигурацию. Единственным приемлемым вариантом увеличения высоты КА является создание параллельно с существующей ОГ ГЛОНАСС в других плоскостях изотрассной ОГ из 30 КА с высотой, большей номинала на 200 км. Достоинством такого варианта является отсутствие необходимости коррекции орбит существующих КА, возможность практического сохранения схем выведения и достоинства самой ОГ (равномерность, изотраснность).

4. Изменение наклона с целью компенсации зон ухудшения точности тоже не целесообразно, так как требует неприемлемых затрат на коррекцию и существенного изменения программы выведения при отсутствии соответствующего эффекта.

Кроме развития ОГ ГЛОНАСС в рамках средневысотных орбит целесообразно рассматривать развитие ОГ за счёт создания регионального сегмента на основе геосинхронных орбит, в том числе геостационарных орбит, геосинхронных наклонных орбит и высокоэллиптических орбит. Достоинством этих орбит являются улучшение навигационных характеристик, в основном на территории РФ, а также возможность осуществлять комплексирование навигационных и связных услуг. В то же время использование дополнения из геосинхронных ОГ потребует серьёзной модерниза-

ции наземного комплекса управления, программы запусков и, скорее всего, создания КА нового типа.

Заключение

На основе проведённого предварительного анализа можно сделать вывод о том, что предпочтительным является вариант перехода к шестиплоскостной ОГ из 30 КА (в штатную группировку добавляются 3 дополнительные плоскости), который обеспечит следующие возможности:

- повышение устойчивости навигации при использовании существующей навигационной аппаратуры потребителей (НАП), функционирующей по 24-м КА ГЛОНАСС, на основе стратегии переключения режимов функционирования части дополнительных КА в случае выхода из строя до 6-ти из 24 КА штатной ОГ;

- существенное повышение качества навигации для перспективной НАП, функционирующей по расширенной ОГ из 30 КА;

- изотраснность орбит и, как следствие, более высокую по сравнению с неизотраснными вариантами устойчивость орбитальных параметров и параметров РНП на протяжении всего срока активного существования без использования корректирующих импульсов;

- преемственность с существующей ОГ и открытость ОГ данного типа к дальнейшему (более 30 КА) эффективному развитию ОГ, пределом которого является достижение состава из 48 КА в виде удвоенной существующей ОГ ГЛОНАСС.

Список литературы

- [1] Чеботарев В. Е., Косенко В. Е. Основы проектирования космических аппаратов информационного обеспечения : учеб. пособие ; Сиб. гос. аэрокосм. ун-т. Красноярск, 2011. 488 с.
- [2] Харисов В. Н. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования / под ред. В. Н. Харисова [и др.]. М. : Радиотехника, 2010. 800 с.
- [3] Сетевые спутниковые радионавигационные системы / В. С. Шебшаевич, П. П. Дмитриев, Н. В. Иванцев [и др.]; под ред. В. С. Шебшаевича. 2-е изд., перераб. и доп. М. : Радио и связь, 1993. 408 с.
- [4] Косенко В. Е., Звонарь В. Д., Кульков А. Н., Чеботарев В. Е., Фаткулин Р. Ф., Ружилова О. В. Программа поддержания штатной орбитальной группировки системы ГЛОНАСС на период до 2020 года // Системный анализ, управление и навигация : материалы 18-й Междунар. конф. Евпатория. 2013.
- [5] Звонарь В. Д., Чеботарев В. Е., Фаткулин Р. Ф., Гречкосеев А. К., Тентилов Ю. А., Волошко Ю. Б. Моделирование параметрических характеристик навигационного КА на теневых орбитах // Системный анализ, управление и навигация : материалы 18-й Междунар. конф. Евпатория. 2013.
- [6] Ступак Г. Г., Ревнивых С. Г., Игнатович Е. И., Куршин В. В., Бетанов В. В., Панов С. С., Бондарев Н. З., Чеботарев В. Е., Балашова Н. Н., Сердюков А. И., Синцова Л. Н. Исследование вариантов совершенствования структуры орбитальной группировки ГНСС ГЛОНАСС до 2020 года и далее с учетом доведения ее состава к 2020 году до 30 КА // Вестник СибГАУ. 2013. № 6. С. 23–31.
- [7] Тестоедов Н. А., Косенко В. Е., Сторожев С. В., Звонарь В. Д., Ермоленко В. И., Чеботарев В. Е. История создания и перспективы развития космической навигации в России // Вестник СибГАУ. 2013. № 6 (52). С. 7–17.
- [8] Тестоедов Н. А., Косенко В. Е., Звонарь В. Д., Фаткулин Р. Ф., Чеботарев В. Е. Концепция программы развития космического комплекса системы ГЛОНАСС // Системный анализ, управление и навигация : материалы 19-й Междунар. конф. Анапа. 2014.

- [9] Прикладной потребительский центр и система информационного обеспечения. ГНСС GALILEO [Электронный ресурс]. URL: <http://ppcmnic.ru/gnss/galileo> (дата обращения: 05.04.2019)
- [10] Прикладной потребительский центр и система информационного обеспечения. ГНСС BEIDOU [Электронный ресурс]. URL: <http://ppcmnic.ru/gnss/beidou> (дата обращения: 05.04.2019)
- [11] Косенко В. Е., Сторожев С. В., Звонарь В. Д., Фаткулин Р. Ф., Чеботарев В. Е. Направления модернизации космического комплекса системы ГЛОНАСС // Системный анализ, управление и навигация : материалы 20-й Междунар. конф. Евпатория. 2015.
- [12] Косенко В. Е., Звонарь В. Д., Волошко Ю. Б., Чеботарев В. Е. Архитектура высокоорбитального дополнения к системе ГЛОНАСС // Системный анализ, управление и навигация : материалы 22-й Междунар. конф. Евпатория. 2017. С. 9–10.

ANALYSIS OF UPGRADE OPTIONS FOR THE STRUCTURE OF ORBITAL GROUPING OF THE GLONASS SYSTEM TO ENSURE ITS COMPETITIVENESS

I. I. Shilko¹, Yu. B. Voloshko¹, O. V. Ruzhilova¹, O. A. Anisimova^{1,2}

¹JSC Academician M. F. Reshetnev Information Satellite Systems, Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, Russian Federation

²Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russian Federation

A synthesis of possible options for upgrading the orbital grouping of the global navigation satellite system GLONASS was carried out based on the following modernization principles: an increase the number of spacecrafts, while maintaining the three-plane structure and changing the height and inclination of the orbits; increase the number of spacecrafts, while maintaining the parameters of the orbits; increasing the number of spacecrafts with the introduction of 3 additional planes to accommodate antipodal spacecraft in them (additional planes are located between the main ones).

The characteristics of the navigation field of the variants of the synthesized orbital groupings were modeled: the basic orbital group of 24 spacecrafts with their uniform placement in 3 planes (GLONASS-24); from 27 spacecrafts with their uniform placement in 3 planes; from 30 spacecrafts with their uniform placement in 3 planes; from 30 spacecrafts based on GLONASS-24, where 2 antipodal spacecrafts are added to each plane; from 30 spacecrafts on the basis of GLONASS-24 with the organization of additional three planes, in which 2 spacecrafts are added each; from 30 spacecrafts uniformly placed in 6 planes; from 36 spacecrafts uniformly placed in 3 planes; from 36 spacecrafts based on GLONASS-24, in which 3 additional planes are added between the standard planes, in which 4 spacecrafts are added each; from 36 spacecrafts on the basis of GLONASS-24, where 4 spacecrafts are added to each regular plane; from 36 spacecrafts based on GLONASS-24, in which 2 antipodal spacecrafts were added to each regular plane, and 2 antipodal spacecrafts were added to 3 additional planes.

Based on the analysis of the characteristics of the navigation field, preference was given to the six-plane orbital group of 30 spacecrafts, built on the basis of GLONASS-24 with the organization of three additional planes.

Keywords: orbital grouping, spacecraft, GLONASS, orbit parameters, orbital grouping structure.

References

- [1] Chebotarev V. E., Kosenko V. E. *Osnovy proektirovaniya kosmicheskikh apparatov informatsionnogo obespecheniya* [Fundamentals of spacecraft design information support]. Krasnoyarsk, SibGAU Publ., 2011. 488 p. (In Russian)
- [2] Kharisov V. N., Perov A. I., Boldin V. A. *GLONASS. Printsipy postroeniya i funktsionirovaniya* [GLONASS. Construction principles and operation]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2010. 800 p. (In Russian)
- [3] Shebshaevich V. S., Dmitriev P. P., Ivantsevich N. V., Kalugin A. V., Kovalevsky E. G., Kudryavtsev I. V., Kutikov V. Yu., Molchanov Yu. B., Maksyutenko Yu. A. *Setevye sputnikovye radionavigacionnye sistemy* [Network satellite radio navigation systems]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1993, 408 p. (In Russian)
- [4] Kosenko V. E., Zvonar V. D., Kulkov A. N., Chebotarev V. E., Fatkulin R. F., Ruzhilova O. V. *Programma podderzhaniya shtatnoj orbital'noj gruppировки sistemy GLONASS na period do 2020 goda* [The program for maintaining the standard orbital grouping of the GLONASS system for the period up to 2020] // *Sistemnyj analiz, upravlenie i navigatsiya : materialy 18-j Mezhdunar. konf.* [System analysis, management and navigation: materials of the 18th International conference]. Evpatoria, 2013. (In Russian)

- [5] Zvonar V. D., Chebotaryov V. E., Fatkulin R. F., Grechkoseyev A. K., Tentilov Yu. A., Voloshko Yu. B. *Modelirovanie parametricheskikh harakteristik navigacionnogo KA na tenevnyh orbitah* [Simulation of parametric characteristics of navigation spacecraft in shadow orbits] // *Sistemnyj analiz, upravlenie i navigaciya : materialy 18-j Mezhdunar. konf.* [System analysis, management and navigation: materials of the 18th International conference]. Evpatoria, 2013. (In Russian)
- [6] Stupak G. G., Revniyykh S. G., Ignatovich E. I., Kurshin V. V., Betanov V. V., Panov S. S., Bondarev N. Z., Chebotarev V. E., Balashova N. N., Serdyukov A. I., Sintsov L. N. *Issledovanie variantov sovershenstvovaniya struktury orbital'noj gruppirovki GNSS GLONASS do 2020 goda i dalee s uchetom dovedeniya ee sostava k 2020 godu do 30 KA* [Investigation of options for improving the structure of the orbital group of GNSS GLONASS until 2020 and further, taking into account bringing its composition up to 30 satellites by 2020] // *Vestnik SibGAU*, 2013, no. 6, pp. 23–31. (In Russian)
- [7] Testoedov N. A., Kosenko V. E., Storozhev S. V., Zvonar V. D., Ermolenko V. I., Chebotarev V. E. *Istoriya sozdaniya i perspektivy razvitiya kosmicheskoy navigacii v Rossii* [The History of Creation and Prospects for the Development of Space Navigation in Russia] // *Vestnik SibGAU*, 2013, no. 6 (52), pp. 7–17. (In Russian)
- [8] Testoedov N. A., Kosenko V. E., Zvonar V. D., Fatkulin R. F., Chebotarev V. E. *Koncepciya programmy razvitiya kosmicheskogo kompleksa sistemy GLONASS* [The concept of the program for the development of the GLONASS space complex] // *Sistemnyj analiz, upravlenie i navigaciya : materialy 19-j Mezhdunar. konf.* [System analysis, management and navigation: materials of the 19th International conference]. Anapa, 2014. (In Russian)
- [9] Applied consumer center and information support system. GNSS GALILEO. Available at: <http://ppcmnic.ru/gnss/galileo> (accessed: 05.04.2019).
- [10] Applied consumer center and information support system. GNSS BEIDOU. Available at: <http://ppcmnic.ru/gnss/beidou> (accessed: 05.04.2019).
- [11] Kosenko V. E., Storozhev S. V., Zvonar V. D., Fatkulin R. F., Chebotarev V. E. *Napravleniya modernizacii kosmicheskogo kompleksa sistemy GLONASS* [Directions of Modernization of the GLONASS Space Complex] // *Sistemnyj analiz, upravlenie i navigaciya : materialy 20-j Mezhdunar. konf.* [System analysis, management and navigation: materials of the 20th International conference]. Evpatoria, 2015. (In Russian)
- [12] Kosenko V. E., Zvonar V. D., Voloshko Yu. B., Chebotarev V. E. *Arhitektura vysokoorbital'nogo dopolneniya k sisteme GLONASS* [Architecture of the High-Orbit Addition to the GLONASS System] // *Sistemnyj analiz, upravlenie i navigaciya : materialy 22-j Mezhdunar. konf.* [System analysis, management and navigation: materials of the 22nd International conference]. Evpatoria, 2017, pp. 9–10. (In Russian)