

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение
высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Институт космических и информационных технологий
институт

Межинститутская базовая кафедра
«Прикладная физика и космические технологии»
кафедра

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой
_____ В.Е. Косенко
подпись инициалы, фамилия
« ____ » _____ 20 ____ г

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

«Разработка предложений по развитию структуры орбитальной группировки
глобальной навигационной спутниковой системы ГЛОНАСС на период
после 2030 года»

тема

27.04.03 Системный анализ и управление

код и наименование направления

27.04.03.06 Основы проектирования космических аппаратов

код и наименование магистерской программы

<u>Научный руководитель</u>	_____	Канд. техн. наук доцент кафедры	И.И. Шилко
	подпись, дата	_____	_____
		должность, ученая степень	инициалы, фамилия
<u>Выпускник</u>	_____		О.А. Анисимова
	подпись, дата		_____
			инициалы, фамилия
<u>Рецензент</u>	_____	Вед. инженер «АО ИСС»	Ю.Б. Волошко
	подпись, дата	_____	_____
		должность, ученая степень	инициалы, фамилия
<u>Нормоконтролер</u>	_____		Е.С. Сидорова
	подпись, дата		_____
			инициалы, фамилия

Красноярск 2019

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение
высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Институт космических и информационных технологий
институт

Межинститутская базовая кафедра
«Прикладная физика и космические технологии»
кафедра

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

_____ В.Е. Косенко

подпись инициалы,

фамилия

« _____ » _____ 20 ____ г

ЗАДАНИЕ
НА ВЫПУСКНУЮ КВАЛИФИКАЦИОННУЮ РАБОТУ
в форме магистерской диссертации

Студенту Анисимовой Ольге Андреевне

фамилия, имя, отчество

Группа КИ17-03-06М Направление (специальность) 27.04.03

номер

код

Системный анализ и управление

наименование

Тема выпускной квалификационной работы: «Разработка предложений по развитию структуры орбитальной группировки глобальной навигационной спутниковой системы ГЛОНАСС на период после 2030 года»

Утверждена приказом по университету № 2061/с от 13.02.2019

Руководитель ВКР: И.И. Шилко, канд. техн. наук, доцент кафедры , начальник
инициалы, фамилия, должность, ученое звание и место работы
сектора 1051 лаборатории 105 АО «ИСС»

Исходные данные для ВКР: Основные требования, предъявляемые к навигационным спутниковым системам

Перечень разделов ВКР: Анализ характеристик существующей орбитальной группировки ГЛОНАСС; анализ возможных вариантов модернизации орбитальной группировки глобальной навигационной спутниковой системы ГЛОНАСС; заключение

Перечень графического материала: Слайды презентации в количестве _____ шт.

Руководитель ВКР

подпись

инициалы и фамилия

Задание принял к
исполнению

подпись

инициалы и фамилия
студента

« ____ » ____ 201 г

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа по теме «Разработка предложений по развитию структуры орбитальной группировки глобальной навигационной спутниковой системы ГЛОНАСС на период после 2030 года» содержит 85 страницы текстового документа, 1 приложение, 17 использованных источников, 8 листов графического материала.

ОРБИТАЛЬНАЯ ГРУППИРОВКА, КОСМИЧЕСКИЙ АППАРАТ, ГЛОБАЛЬНАЯ НАВИГАЦИОННАЯ СПУТНИКОВАЯ СИСТЕМА ГЛОНАСС, ПАРАМЕТРЫ ОРБИТЫ, СТРУКТУРА ОРБИТАЛЬНОЙ ГРУППИРОВКИ, РОЙ, МАЛОРАЗМЕРНЫЕ КОСМИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ

Объект разработки: потребители системы ГЛОНАСС

Цель разработки предложений: развитие структуры орбитальной группировки ГНСС ГЛОНАСС для конкурентоспособности.

Рассмотрены различные варианты развития структуры орбитальной группировки ГНСС ГЛОНАСС на период после 2030 года.

Предложено новое направление развитие структуры орбитальной группировки системы ГЛОНАСС на основе роевых систем.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	7
1 Анализ характеристик существующей орбитальной группировки ГЛОНАСС.....	9
1.1 Характеристики навигационных спутниковых систе.....	9
1.2 Оценка глобальных точностных характеристик навигационного поля.....	11
2 Анализ возможных вариантов модернизированных орбитальных группировок ГЛОНАСС, обеспечивающих конкурентоспособность системы ГЛОНАСС. Их характеристики и методы создания.....	15
2.1 Синтез возможных вариантов модернизации орбитальной группировки системы ГЛОНАСС	15
2.1.1 Модернизированные орбитальные группировки из 27 космических аппаратов	15
2.1.2 Модернизированные орбитальные группировки из 30 космических аппаратов	18
2.2 Модернизация структуры орбитальной группировки на основе добавления космических аппаратов в существующие плоскости орбитальной группировки ГЛОНАСС без модификации существующих слотов штатной орбитальной группировки.....	19
2.3 Модернизация орбитальной группировки ГЛОНАСС на основе введения дополнительных плоскостей.....	20
2.4 Варианты дальнейшего развития орбитальной группировки системы ГЛОНАСС до 36 космических аппаратов	22
2.5 .. Высокоорбитальный космический комплекс.....	23
2.5.1 Состав параметров орбитальной группировки высокоорбитального космического комплекса	25
2.5.2 Орбитальная группировка высокоорбитального космического комплекса на геосинхронных наклонных круговых орбитах	27
2.5.3 Орбитальная группировка на орбитах типа QZSS.....	37
2.5.4 Орбитальная группировка высокоорбитального комплекса на орбитах M15	48

2.5.5 Орбитальная группировка высокоорбитального космического комплекса на орбитах типа «Тундра».....	56
2.6 Рой малоразмерных космических аппаратов для решения задач навигации.....	68
2.6.1 Оценка точности навигационных определений наземных потребителей при использовании сигналов роевого дополнения и ГЛОНАСС.....	73
Заключение	76
Список сокращений	78
Список использованных источников	79
Приложение А Результат моделирования	82

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 космического аппарата (КА) следующего поколения «ГЛОНАСС-К». Их использование определит основные 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 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 развёрнуты, 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 трех зарубежных ГНСС.

Таблица 1 - Параметры орбиты ГНСС ГЛОНАСС/GPS/Galileo/BeiDou [9,10]

Количество штатных КА	Высота орбиты, км	Количество плоскостей
24/ 32/27/27	19100 / 20200 / 23222 / 35786	3 / 6 / 3 / 3

Целью магистерской диссертации является разработка предложений по развитию орбитальной группировки (ОГ) спутниковой навигационной системы ГЛОНАСС.

Для достижения поставленной цели, необходимо решить следующие задачи:

- 1) разработать рекомендации по развитию ОГ системы ГЛОНАСС;
- 2) выполнить моделирование выбранных рекомендаций;
- 3) провести анализ результатов моделирования.

1 Анализ характеристик существующей орбитальной группировки ГЛОНАСС

1.1 Характеристики навигационных спутниковых систем

Анализ навигационных спутниковых систем проводится по параметрам, определяющим качество навигационного поля за счет структуры орбитальной группировки:

- видимость навигационного созвездия;
- геометрический фактор (ГМФ);
- доступность навигации по выполнению условий для заданных значений геометрических факторов.

Геометрические факторы указывают, насколько конкретная геометрическая конфигурация рабочего созвездия (определяемая структурой ОГ) видимых спутников влияет на ухудшение точности определения конкретного параметра по сравнению с некой стандартизированной точностью измерения псевдодальности.

Геометрический фактор рассчитывается на заданном интервале времени T с шагом по времени Δt по равномерно распределенным точкам заданного региона. На каждый момент времени t в каждой точке $P(x_p, y_p, z_p)$ заданного региона рассчитываются матрица A частных производных по n радиовидимым спутникам. Вычисляются матрицы $F=A^T*A$ и $K=F^{-1}$.

Позиционный (пространственный) геометрический фактор $PDOP$ и временной геометрический фактор $TDOP$ в данной точке $P(x_p, y_p, z_p)$ на момент времени t вычисляется по формуле (1.1):

$$PDOP(P, t) = \sqrt{k_{11} + k_{22} + k_{33}}, \quad (1.1)$$

где, $k_{11}, k_{22}, k_{33}, k_{44}$ - диагональные элементы матрицы K .

В практике так же используются разложение пространственного геометрического фактора на высотный $VDOP$ и плановый $HDOP$ геометрические факторы. Для вычисления необходимо элементы матрицы A пересчитывать в прямоугольную пунктовую систему координат. (Ось «В» на Север, ось «Н» в зенит, ось «L» на Восток).

В этом случае $VDOP$ и $HDOP$ вычисляются по формуле (1.2), (1.3):

$$VDOP(P,t)=\sqrt{k_{22}} \quad (1.2)$$

$$HDOP(P,t)=\sqrt{k_{11} + k_{33}} \quad (1.3)$$

Средние значения геометрических факторов, обеспечиваемые ОГ системы ГЛОНАСС на интервале времени T в заданном регионе, рассчитываются по формуле 1.4:

$$\overline{PDOP} = \frac{1}{N} \sum_1^N PDOP(P,t) \quad (1.4)$$

где $N = (T/\Delta t + 1) * \text{количество точек в регионе}$.

Доступности решения навигационной задачи – это характеристики РНП, отражающие для потребителя возможность на данном временном интервале и в данном регионе воспользоваться навигационным полем для навигации при заданных ограничениях по точности или значениям геометрических факторов. Доступность навигационного обеспечения – это процент времени на принятом интервале (сутки, месяц, год) и в принятом регионе, в течение которого значения точности или геометрических факторов не превышают заданную величину.

Доступность навигационного поля рассчитывается как среднее значение (на каждый момент времени t интервала T в каждой точке $P(x_p, y_p, z_p)$ заданного региона) релейной функции:

$$f(P, t) = \begin{cases} 1, & \text{если } PDOP \leq PDOP_{зад} \\ 0, & \text{если } PDOP > PDOP_{зад} \end{cases} \quad (1.5)$$

где, $PDOP_{зад}$ – заданное значение.

В Российской Федерации и международном навигационном сообществе $PDOP_{зад} = 6$

1.2 Оценка глобальных точностных характеристик навигационного поля

Глобальная навигационная спутниковая система ГЛОНАСС с орбитальной группировкой из 24 КА обеспечивает в обычных условиях (на открытой местности) глобальную доступность навигационного обеспечения при условии $PDOP < 6$ – 99,99% и среднее по Земле значение $PDOP$ - 1,94.

Следует отметить, что зарубежные аналоги ГЛОНАСС в настоящее время обеспечивают несколько более лучшие показатели, что актуализирует постановку задачи и совершенствовании орбитального построения системы ГЛОНАСС. Геометрическое построение орбитальной группировки системы ГЛОНАСС обеспечивает для потребителей, расположенных на территории Российской Федерации видимость 7-и КА и хорошую геометрию навигационного созвездия. Доступность навигационного обеспечения на территории России составляет 100% на открытой местности, если угол видимости спутника Глонасс над горизонтом превышает минимальное значение, равное 5° .

В реальных условиях (городская застройка, горный рельеф, лесные массивы и др.) угол видимости потребителем спутников системы ГЛОНАСС над горизонтом может значительно превышать заявленные 5 градусов. В

целом это приводит к снижению количества видимых потребителем спутников и, соответственно, ухудшению точности навигации.

На рисунках 1 и 2 приведена оценка доступности навигации (при условии PDOP<6) и среднего значения пространственного геометрического фактора (PDOP) в условиях ограниченной видимости, превышающей угол места от 5 до 25 градусов, в целом по земле (М) и на территории России (Р). При ограничениях по углу места 25 градусов доступность навигационного обеспечения снижается до $\approx 50\%$ в целом по Земле, на территории России до $\approx 66\%$. Среднее значение PDOP возрастает в целом по Земле до 18,34, на территории России до 17, что не обеспечивает требуемые уровни доступности и устойчивости навигации потребителей системы ГЛОНАСС

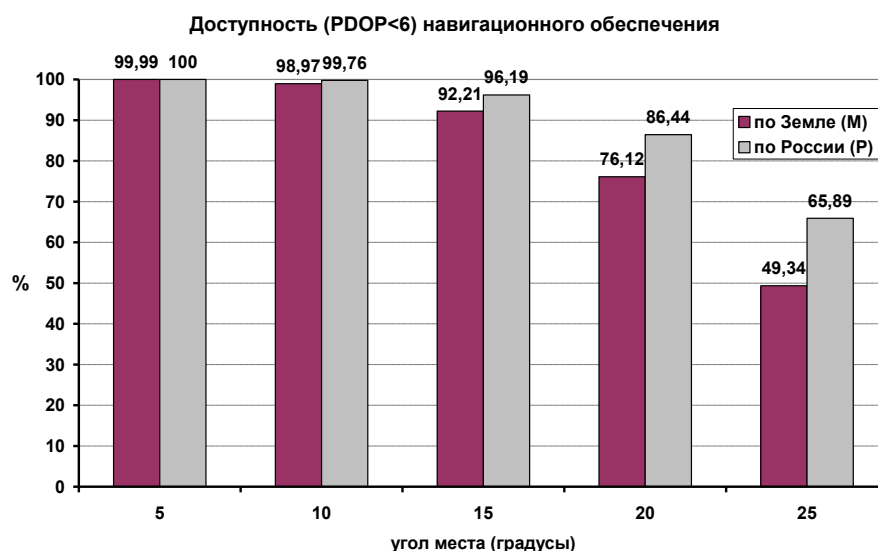


Рисунок 1 - Доступность навигационного обеспечения в зависимости от угла видимости потребителем спутников системы ГЛОНАСС

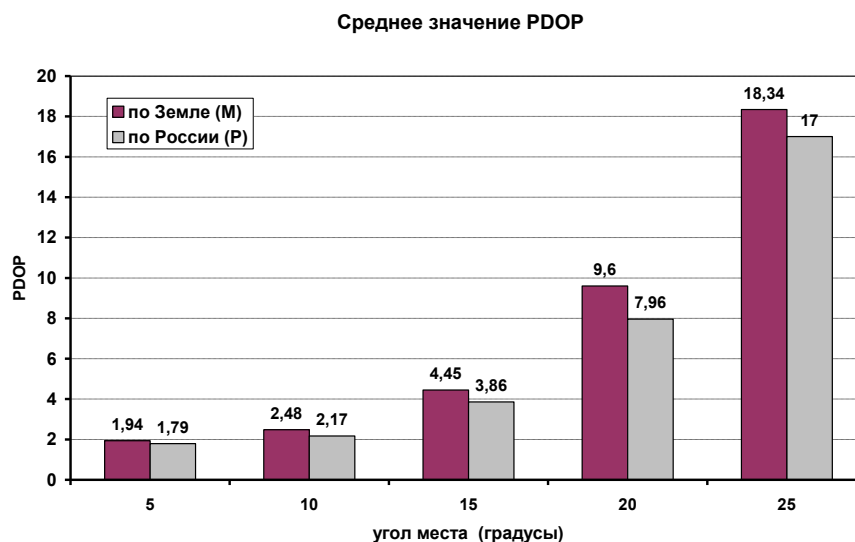


Рисунок 2 – Среднее значение пространственного геометрического фактора в зависимости от угла видимости потребителем спутников системы ГЛОНАС

Опыт эксплуатации системы ГЛОНАСС показывает, состав орбитальной группировки может меняться от 24 до 22 и менее КА. Это вызвано рядом неизбежных причин:

- перерывы в использовании отдельных КА в связи с выводом на техническое обслуживание;
- случайные отказы целевой аппаратуры и вывод КА из системы для восстановления работоспособности, последующего периода набора измерительной информации средствами НКУ;
- плановое и внеплановое восполнение орбитальной группировки так же не всегда бывают успешным в связи с авариями ракет носителей и разгонных блоков.

Выход из системы одного или нескольких КА орбитальной группировки ведет к увеличению геометрического фактора, снижению доступности навигации и соответственно ухудшению точности позиционирования.

Орбитальная группировка из 23 КА приводит к снижению глобальной доступности до $\approx 99,94\%$ и ухудшению среднего значения пространственного геометрического фактора до 2,04. На территории России ОГ из 23 КА обеспечивает 100% доступность и среднее значение PDOP 1,83.

Прекращение функционирования 3-х КА системы ГЛОНАСС из 24 в худшем случае может привести к существенному снижению доступности на открытой местности до 96% и ухудшению точности позиционирования за счет ГМФ на 15% в целом по всей Земле.

Деградация навигационных характеристик в среднем по Земле и на территории Российской Федерации при выбывании от 1 до 4 КА приведена в таблице 2.

Таблица 2 - Деградация навигационных характеристик по всей Земле при выбывании КА

Число КА	Доступность PDOP ≤ 6 (%)		PDOP среднее	
	по всей Земле	на территории РФ	по всей Земле	на территории РФ
24	99,997	100	1,94	1,74
23	99,946	100	2,04	1,83
22	99,454	99,964	2,14	1,92
21	98,442	99,8	2,25	2,02
20	96,982	99,407	2,36	2,12

При этом ограничения структуры навигационных сообщений в сигналах ГЛОНАСС с частотным разделением и лимит доступных частотных литер не позволяет использование потребителем более 24 КА. Это исключает возможности поддержания функционально избыточного количества КА, как например, в системе GPS (32 КА, вместо минимально необходимых 24-х КА).

2 Анализ возможных вариантов модернизированных орбитальных группировок ГЛОНАСС, обеспечивающих конкурентоспособность системы ГЛОНАСС. Их характеристики и методы создания

2.1 Синтез возможных вариантов модернизации орбитальной группировки системы ГЛОНАСС

Внедрение новых навигационных сигналов ГЛОНАСС с кодовым разделением и гибкой структурой навигационных сообщений позволяет снять ограничение (упомянутые в предыдущей главе) как на количество КА в орбитальной группировке, так и на параметры орбит навигационных КА. Это открывает возможности модернизации орбитальной группировки ГЛОНАСС.

Модернизация существующей ОГ ГЛОНАСС посвящено ряд опубликованных работ [6,7,11,12] и может осуществляться путём:

- увеличения числа КА с сохранением трёхплоскостной структуры и изменением высоты и наклона 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.

2.1.1 Модернизированные орбитальные группировки из 27 космических аппаратов

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 наклона 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 наклонов, 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).

Ниже в таблице 3 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, $i=57,0^\circ$); и ОГ GALILEO ($a = 29600$ км, $i= 57,0^\circ$), также состоящая из 27 КА.

Таблица 3 -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

Окончание таблицы 3

	ОГ ГЛОНАСС-27 Г*/Р*	ОГ ГЛОНАСС-27* Г/Р	ОГ GALILEO-27 Г/Р
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 России.			

Наиболее приемлемый вариант модернизации ОГ системы ГЛОНАСС (ОГ из 27 КА с сохранением её наклона, но изменением высоты на ~100 км). Незначительное изменение высоты орбиты позволит:

Во-первых: использовать для запусков новых КА те же средства выведения, что и для штатного ГЛОНАСС.

Во-вторых: энергетика двигательной установки КА Глонасс позволит переводить ранее запущенные космический аппарат на новую орбиту.

Для реализации предложенного варианта 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[13].

2.1.2 Модернизированные орбитальные группировки из 30 космических аппаратов

Изотрассные варианты ОГ, состоящие из 30 КА, требуют повышения высоты орбиты ОГ ГЛОНАСС на 200 км. Такая ОГ имеет большую полуось a , равную 25710 км, повторяемость 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 (неизотрассная), и несколько лучше, чем у GALILEO из 27 КА. В таблице 4 приведены навигационные характеристики этих 3-х ОГ.

Таблица 4 - 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
Примечание*: Г – глобальная зона обслуживания, Р - зона обслуживания территории России.			

Рассмотренные в данном разделе ОГ из 30 КА дают существенный эффект в улучшении навигационных характеристик. При их формировании практически не должны возникать проблемы с энергетикой ни средств выведения, ни двигательной установки КА.

Однако эти варианты создают определённые риски при формировании ОГ (несрабатывание одной из ДУ не позволит добиться нужного результата) и кроме того переходный процесс для них длительный по времени и ухудшает характеристики радионавигационных полей (РНП) [13].

2.2 Модернизация структуры орбитальной группировки на основе добавления космических аппаратов в существующие плоскости орбитальной группировки ГЛОНАСС без модификации существующих слотов штатной орбитальной группировки

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 спутников: по 2 в каждую плоскость, расположение спутников антиподное. Значения аргументов широт для этого варианта приведены в таблице 5.

Таблица 5 - 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

Жирным шрифтом выделены те спутники, которые добавлены в номинальную 24-х спутниковую группировку систему ГЛОНАСС [13].

2.3 Модернизация орбитальной группировки 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 таблицеб.

Таблица 6 - 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

Жирным шрифтом выделены дополнительные 6 спутников ГЛОНАСС в дополнительных 3-х плоскостях.

Все остальные параметры: наклонение орбиты, долгота восходящего узла, высота орбиты, эксцентриситет (орбиты круговые) – соответствуют номинальным параметрам системы ГЛОНАСС. Отметим, что ОГ-30А из таблицы 6 является однотрассовой.

Далее в таблице 7 приводятся навигационные характеристики всех приведённых выше вариантов модернизации ОГ из 30 КА.

Таблица 7 - 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

Примечание*: Г – глобальная зона обслуживания, Р - зона обслуживания территории России.

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.

2.4 Варианты дальнейшего развития орбитальной группировки системы ГЛОНАСС до 36 космических аппаратов

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 плоскости 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 8 - 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 $PDOP \leq 6$ на открытой местности с ограничениями по углу места 5° (%)	1/1	1/1	1/1	1/1

Окончание таблицы 8

Доступность повышенной точности по условию PDOP \leq 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 \leq 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
Примечание *: Г – глобальная зона обслуживания, Р - зона обслуживания территории России.				

Как и в случае ОГ из 30 КА при доведении численности КА до 36 наилучшим вариантом из этого класса ОГ является равномерная ОГ-36 [13].

2.5 Высокоорбитальный космический комплекс

Одним из вариантов совершенствования системы ГЛОНАСС является построение Глобально-региональной спутниковой системы. То есть такой системы, которая обеспечивала бы удовлетворительное решения оборонных и гражданских приложений в глобальном масштабе и превосходные характеристики в регионе экономических интересов Российской Федерации. Очевидно, что регионом экономических интересов Российской Федерации является территория России и Арктики, а также территории граничащих с РФ государств. Ярким примером такого подхода является китайская система Бейдоу.

Для улучшения региональных характеристик системы ГЛОНАСС возможно её дополнение подсистемой космических аппаратов на геосинхронных наклонных орбитах, подспутниковые трассы которых будут покрывать территорию РФ. Такой подход позволяет меньшим количеством дополнительных космических аппаратов повысить плотность покрытия зонами обслуживания территории РФ.

Наряду с этим на эти космические аппараты возможно наложить дополнительные информационные функции, например распространение информации дифференциальных дополнений на территорию РФ и Арктики.

В качестве исходной орбитальной группировки на основе средневысотных орбит необходимо использовать:

- ОГ-24 – штатную ОГ из 24 КА на средневысотных орбитах;
- ОГ-30А – шестиплоскостную ОГ на базе ОГ ГЛОНАСС-24 с тремя дополнительными плоскостями, в которых размещено по 2 КА;

ОГ ВКК могут быть созданы на орбитах типа ГСНО, «Тундра», М15 и «QZSS». Достоинством орбит этих типов являются повышение навигационных характеристик на территории Российской Федерации, включая северные территории, а также возможность на основе КА этого типа дополнительно осуществлять реализацию навигационных и связных услуг различного типа.

Следует подчеркнуть, что реализация орбитальной структуры ВКК потребует серьезной модернизации НКУ (станций мониторинга и закладки), программы запусков и создания КА нового типа.

В настоящее время известны высокоорбитальные навигационные сегменты, создающие орбитальные дополнения GPS: для Японии – QZSS и для Индии – IRNSS. Вопросы построения перспективной ОГ ГЛОНАСС и ее высокоорбитального космического сегмента особенно важны, потому что требования к перспективному навигационному обеспечению потребителей чрезвычайно высоки как по точности (до одного метра в абсолютном режиме), так и по доступности и непрерывности навигации – до 100%. Эти навигационные характеристики в значительной мере определяются орбитальной группировкой.

Создание высокоорбитального космического комплекса (ВКК), состоящего ориентировочно из 4-6 космических аппаратов, позволит обеспечить:

- излучение навигационных сигналов в интересах повышения доступности и точности навигационных определений;

– ретрансляцию высокоточной эфемеридно-временной информации функциональных дополнений глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС), информации о целостности ГНСС;

– выполнение отдельных функций управления системой ГЛОНАСС, в том числе в части оперативной закладки на КА эфемеридно-временной информации и взаимной синхронизации элементов наземного сегмента.

Высокоорбитальный космический комплекс, созданный как дополнение к штатной ОГ ГЛОНАСС из 24 КА должен обеспечивать непрерывную навигацию и стопроцентную доступность навигационного обеспечения в городских и горных условиях на всей территории Российской Федерации и, тем самым, конкурентоспособность ГЛОНАСС с зарубежными ГНСС.

Для космической связи и навигации в настоящее время в основном рассматриваются следующие типы орбит:

– геосинхронные наклонные круговые орбиты (ГСНО) с периодом, равным звездным суткам;

– наклонные эллиптические суточные орбиты типа QZSS, с периодом, равным звездным суткам;

– наклонные эллиптические суточные орбиты M15, с периодом, равным звездным суткам;

– наклонные эллиптические суточные орбиты, получившие название «Гундра», с периодом, равным звездным суткам.

2.5.1 Состав параметров орбитальной группировки высокоорбитального космического комплекса

К классическим элементам орбиты относятся:

- большая полуось (a) и драконический период (T);
- эксцентриситет (e);

- наклонение (i);
- аргумент перицентра (ω)
- долгота восходящего узла (δ_0);
- средняя аномалия (M_0) или аргумент широты.

Параметры структуры орбитальной группировки (в том числе трасс полета) вместе с классическими параметрами орбиты являются элементами, определяющими орбитальный сегмент ВКК.

Структуру орбитальной группировки ОГ ВКК определяют:

- общее число КА в ОГ ВКК,
- число плоскостей в ОГ;
- количество трасс ОГ;
- число КА, как правило, равномерно проходящих по каждой трассе;
- географическая долгота восходящих узлов (ГДВУ) каждой трассы (или долгота зенитных точек каждой трассы);
- параметры взаимной синхронизации – сдвиги аргументов широты (аномалий) движения КА из разных трасс.

Значения прямого восхождения восходящего узла (Ω) плоскостей и аргументов широты в плоскостях определяется в соответствии со значениями зенитных точек трасс КА и временем их прохождения КА.

Остальные параметры (высоты перигея и апогея, аргумент перигея) базовых (основных) типов орбит КА ВКК приведены в таблице 9.

Таблица 9 - Параметры орбит КА базовых ОГ: ГСНО, QZSS, M15, Тундра.

Номинальное значение наклонения для всех типов КА – 64.8^0

Тип КА	Высота перигея, км	Высота апогея, км	Эксцентриситет	Арг. перигея град.
ГСНО	35790	35790	0	0
QZSS	32750	38820	0.072	270
M15	29470	42120	0.15	270
Тундра	21660	49910	0.335	270

ОГ ВКК должна быть создана для обеспечения эффективного функционирования совместно с ОГ ГЛОНАСС в условиях высокого уровня затенения навигационных космических аппаратов (сложный рельеф местности, городская застройка) и обеспечения улучшения характеристик системы ГЛОНАСС по доступности и геометрическим факторам ОГ на территории России и Арктики. Поэтому исследования проводятся для совместной группировки из 24 КА системы ГЛОНАСС и ОГ ВКК по следующим показателям:

- среднее значение пространственного геометрического фактора PDOP для угла места 5° ;
- среднее значение пространственного геометрического фактора PDOP для угла места 25° ;
- доступность по условию $PDOP \leq 2$ на открытой местности с ограничениями по углу места 5° (для контроля обеспечения требований повышенной точности);
- доступность по условию $PDOP \leq 6$ в городской и горной местности с ограничениями по углу места 25° .

Оценка навигационных характеристик ОГ ГЛОНАСС и рассматриваемых вариантов ОГ ВКК будет проводиться на территории Российской Федерации и Арктики, ограниченной широтой от 40° с.ш. до 85° с.ш, долготой от 30° в.д до 190° в.д (далее «территория России»).

2.5.2 Орбитальная группировка высокоорбитального космического комплекса на геосинхронных наклонных круговых орбитах

2.5.2.1 Орбитальная группировка на геосинхронных наклонных круговых орбитах с одной наземной трассой

На рисунке 3 представлена трасса геосинхронных наклонных круговых орбит (ГСНО) с периодом, равным звездным суткам и центром трассы и, одновременно, географической долготой восходящего узла (ГДВУ) 90° в.д.

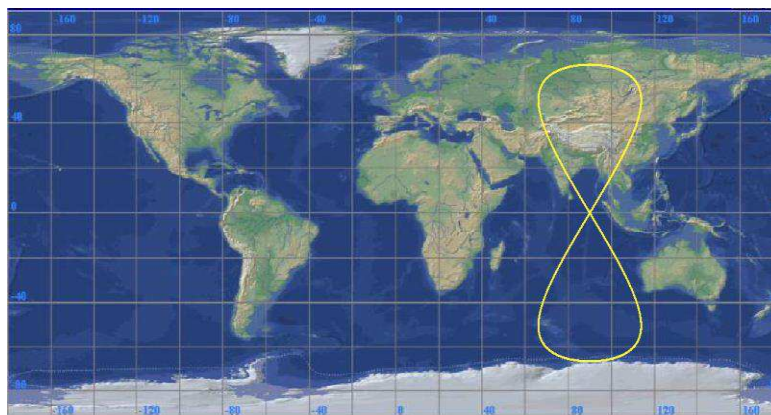


Рисунок 3 - Трасса геосинхронных наклонных орбит (ГДВУ 90° в.д.)

ОГ из 4 КА ВКК на ГСНО, двигающиеся вдоль одной трассы на данной орбите, обеспечит в целом по Земле видимость двух КА $\approx 48\%$.

На рисунке 4 представлена карта покрытия Земли минимальным количеством видимых КА для орбитальной группировки из 4 КА на ГСНО с ГДВУ 90° в.д. На рисунке 5 приведены гистограмма и функция распределения количества видимых КА ОГ ВКК.

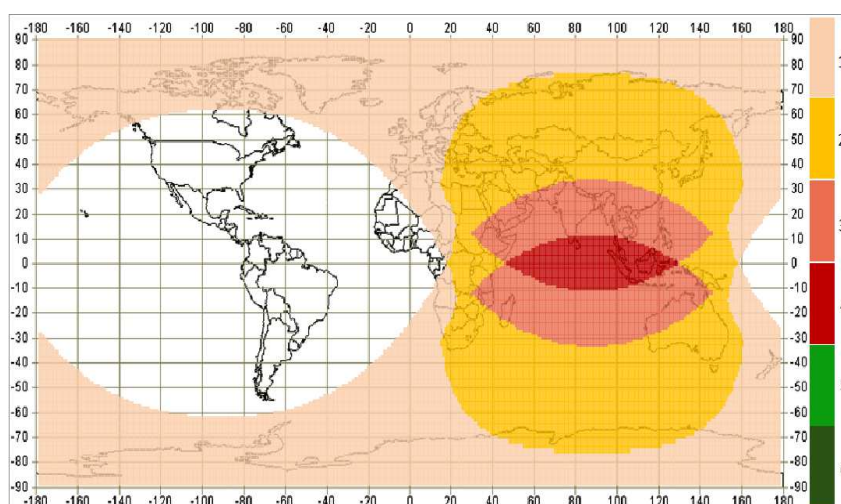


Рисунок 4 - Покрытие Земли минимальным количеством КА, обеспечиваемое ОГ из 4 КА на ГСНО (ГДВУ 90° в.д.) для угла места 5°

Количество КА	Гистограмма	Функция распределения
0	0.277792	1
1	0.245298	0.722208
2	0.217039	0.476911
3	0.189714	0.259872
4	0.0701577	0.0701577

Рисунок 5 - Таблица видимости КА на ГСНО

На территории России орбитальная группировка из 4 КА ВКК, двигающиеся вдоль одной трассы, обеспечит гарантированную видимость одного КА 100% и видимость двух КА 90%.

В условиях ограниченной видимости по углу места 25° ОГ из 4 КА, двигающиеся вдоль одной наземной трассы, обеспечит видимость одного КА на всей территории России 98,9%. Два КА будут видны с любой точки России с вероятностью 58,97%. На рисунке 6 приведена карта покрытия для угла места 25° .

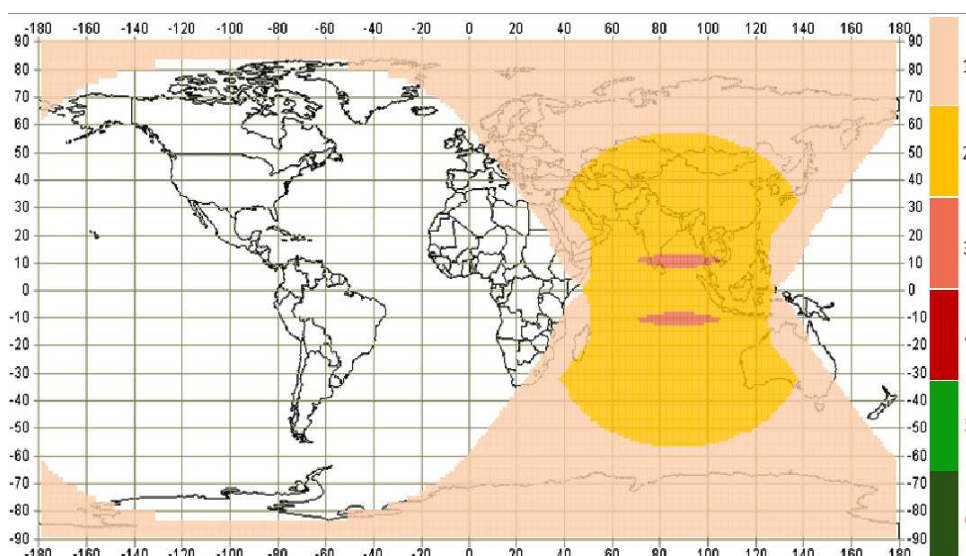


Рисунок 6 - Покрытие Земли минимальным количеством КА, обеспечиваемое ОГ из 4 КА на ГСНО (ГДВУ 90° в.д.) для угла места 25°

Доступность по условию $PDOP \leq 2$, обеспечиваемая совместно с орбитальной группировкой ГЛОНАСС, составляет 95,5% на территории России. В городской и горной местности с ограничениями по углу места 25° доступность по условию $PDOP \leq 6$ составит 83,5%.

Орбитальная группировка из 4 КА на ГСНО с ГДВУ 90° в.д. совместно с орбитальной группировкой ГЛОНАСС обеспечивает на территории России среднее значение пространственного геометрического фактора $PDOP = 1,56$. В условиях ограниченной видимости (угол места 25°) $PDOP = 5,39$.

При увеличении общего числа КА ОГ ВКК на ГСНО до шести территория России практически полностью (99,8%) будет покрыта как минимум двумя КА. Видимость трех КА составит 86% - рисунок 7.

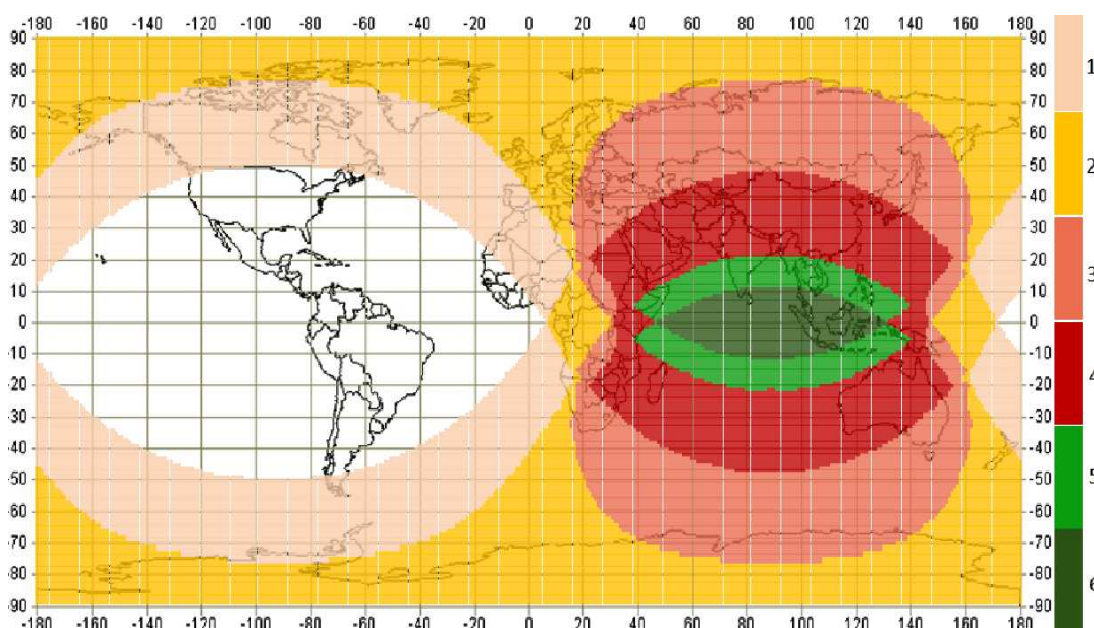


Рисунок 7 - Покрытие Земли минимальным количеством КА, обеспечиваемое ОГ из 6 КА на ГСНО (ГДВУ 90° в.д.) для угла места 5°

На карте покрытие Земли минимальным количеством КА (рисунок 7) отмечено, что в районе экватора создается зона, в которой постоянно видно все шесть КА ОГ на ГСНО. Это дает теоретическую возможность размещения в этой зоне наземного пункта управления.

В городской и горной местности с ограничениями по углу места 25° ОГ из 6-ти КА, двигающиеся вдоль одной наземной трассы, обеспечит практически постоянную видимость одного КА на всей территории России. Два КА будут видны с любой точки России с вероятностью 89%. На рисунке 8 приведена карта покрытия для угла места 25° .

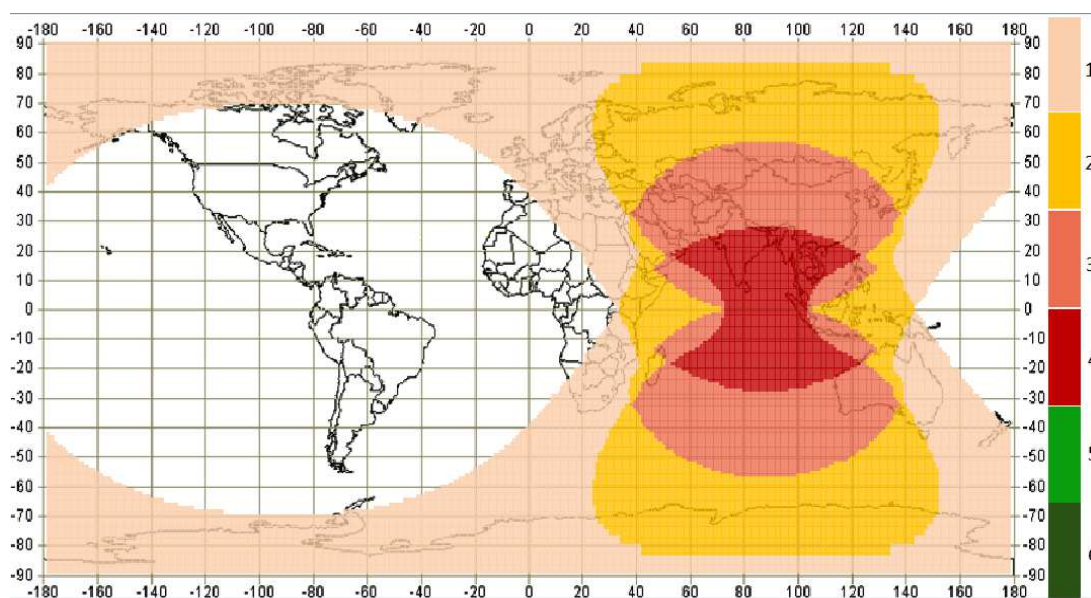


Рисунок 8 - Покрытие Земли минимальным количеством КА, обеспечиваемое ОГ из 6 КА на ГСНО (ГДВУ 90° в.д.) для угла места 25°

ОГ из 6-ти КА, двигающиеся вдоль одной наземной трассы (ГДВУ 90° в.д.) совместно с ОГ ГЛОНАСС обеспечивает на территории России среднее значение $PDOP=1,464$. В условиях ограниченной видимости (угол места 25°) $PDOP=3,99$.

Доступность по условию $PDOP \leq 2$, обеспечиваемая совместно с орбитальной группировкой ГЛОНАСС, составляет 98,7%. В городской и горной местности с ограничениями по углу места 25° доступность по условию $PDOP \leq 6$ составит 89%.

2.5.2.2 Орбитальная группировка на геосинхронных наклонных орбитах с двумя наземными трассами

Вариант ОГ из 6-ти КА, двигающиеся вдоль двух наземных трасс (ГДВУ 60° в.д. и 120° в.д.) по три КА вдоль каждой трассы, представлен на рисунке 9.

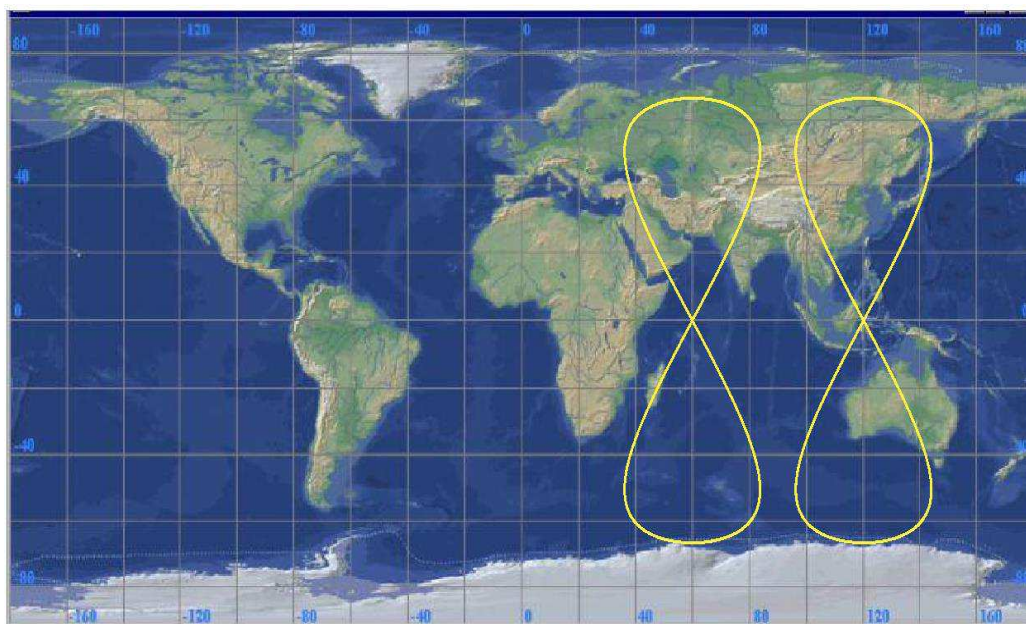


Рисунок 9 - Трасса геосинхронных наклонных орбит
(ГДВУ 60° в.д. и 120° в.д.)

Такая ОГ обеспечит на территории России гарантированную видимость двух КА $\approx 98,8\%$, что несколько хуже, чем для ОГ из 6-ти КА, двигающиеся вдоль одной наземной трассы ($99,8\%$). Карта покрытия орбитальной группировкой из 6 КА на ГСНО (ГДВУ 60° в.д. и 120° в.д.) представлена на рисунке 10.

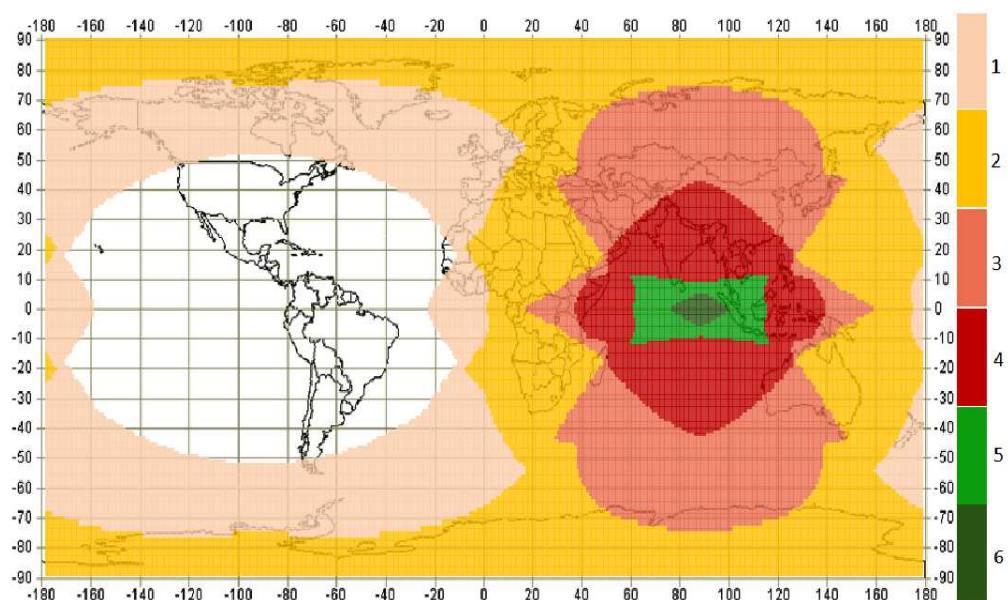


Рисунок 10 - Покрытие Земли минимальным количеством КА, обеспечиваемое ОГ из 6 КА на ГСНО (ГДВУ 60°в.д. и 120°в.д.) для угла места 5°

В городской и горной местности с ограничениями по углу места 25°ОГ из 6-ти КА,двигающиеся по три КА вдоль двух наземных трасс, обеспечит видимость одного КА на всей территории России в 99,8% случаях. Два КА будут видны с любой точки России с вероятностью 84%. На рисунке 11 приведена карта покрытия для угла места 25°.

Доступность по условию $PDOP \leq 2$, обеспечиваемая совместно с орбитальной группировкой ГЛОНАСС, составляет 98,3% на территории России. В городской и горной местности с ограничениями по углу места 25° доступность по условию $PDOP \leq 6$ составит 87,3%.

ОГ ВКК из 6-ти КА,двигающиеся по три КА вдоль двух наземных трасс (ГДВУ60°в.д. и 120°в.д.) совместно с ОГ ГЛОНАСС обеспечивает на территории России среднее значение пространственного геометрического фактора $PDOP=1,483$. В условиях ограниченной видимости (угол места 25°) $PDOP=4,64$.

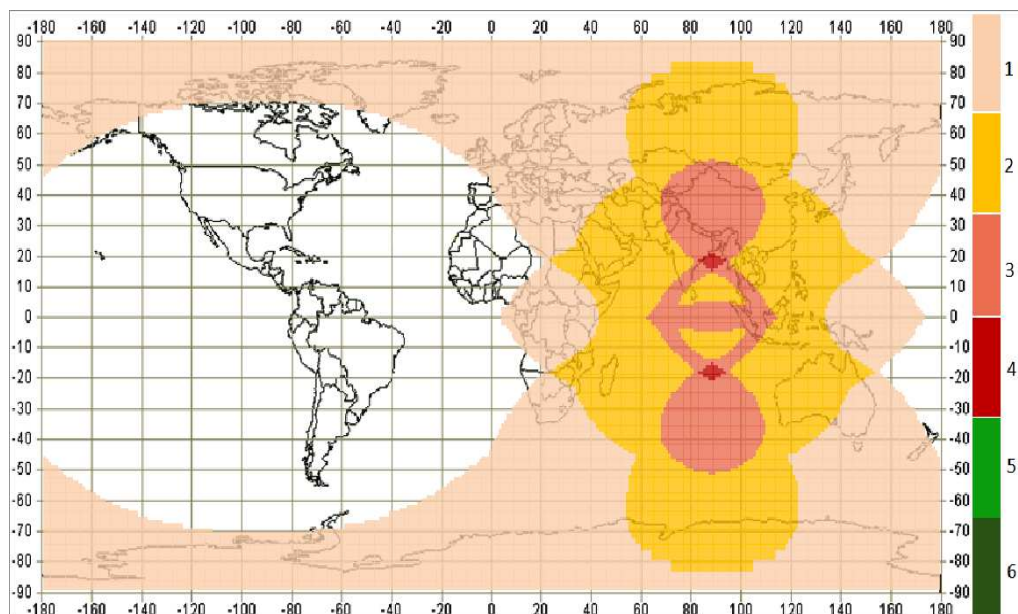


Рисунок 11 - Покрытие Земли минимальным количеством КА, обеспечиваемое ОГ из 6 КА на ГСНО (ГДВУ 60° в.д. и 120° в.д.) для угла места 25°

Рассмотрим вариант ОГ из 6-ти КА,двигающиеся по три КА вдоль двух наземных трасс, в которых ГДВУ сдвинуты ближе друг к другу 70° в.д. и 110° в.д. Трасса представлена на рисунке 12, карты покрытия для углов места 5° и 25° - на рисунках 13,14 соответственно.

Такая орбитальная группировка обеспечит покрытие на территории России и Арктики несколько лучше, чем вариант ОГ (ГДВУ 60° в.д. и 120° в.д.), и несколько хуже, чем ОГ из 6-ти КА,двигающиеся вдоль одной наземной трассы.

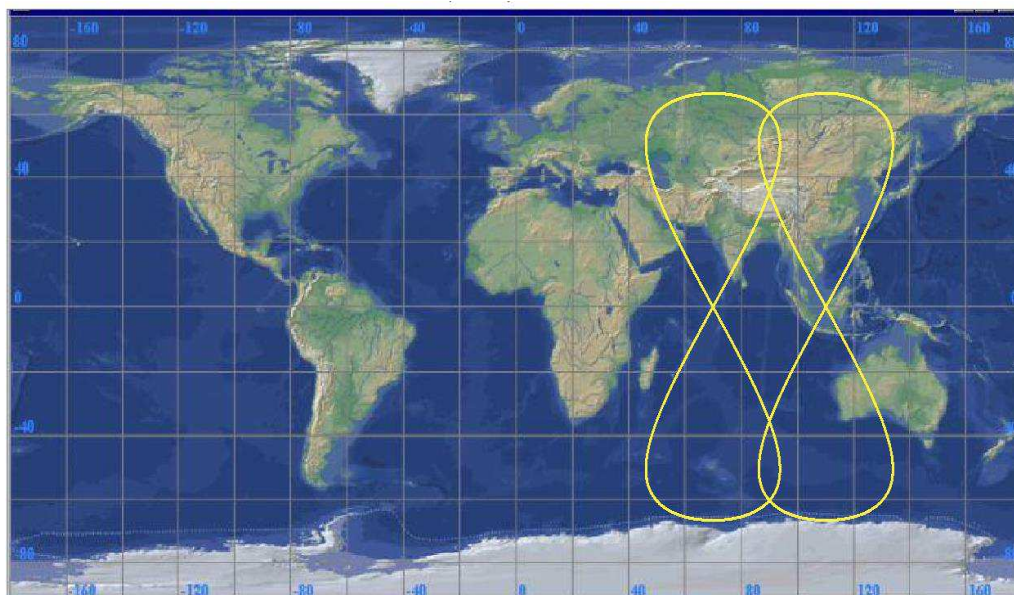


Рисунок 12 - Трасса геосинхронных наклонных орбит
(ГДВУ 70°в.д. и 110°в.д.)

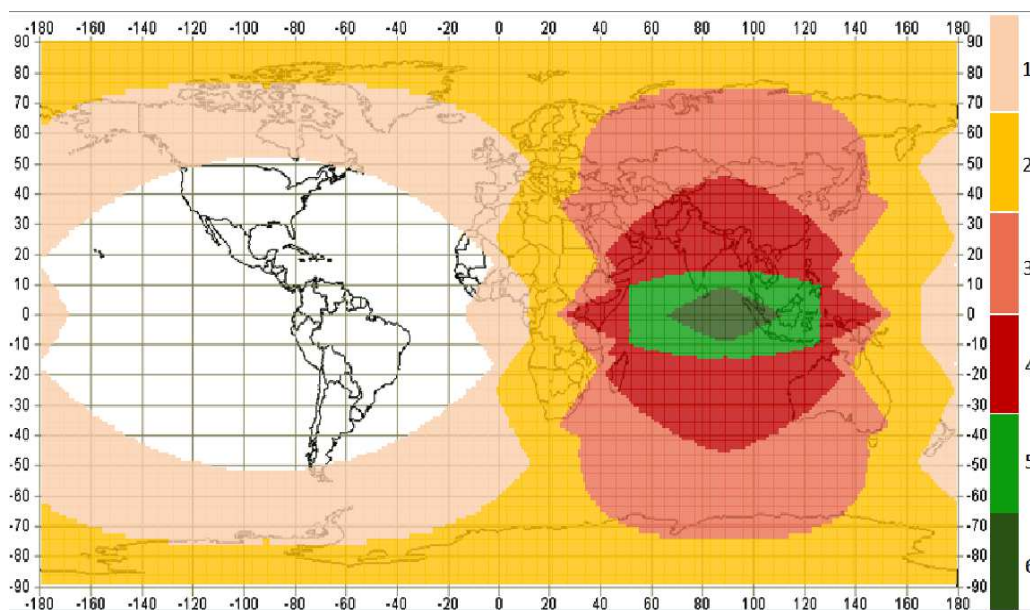


Рисунок 13- Покрытие Земли минимальным количеством КА,
обеспечиваемое ОГ из 6 КА на ГСНО (ГДВУ 70°в.д. и 110°в.д.) для угла
места 5°

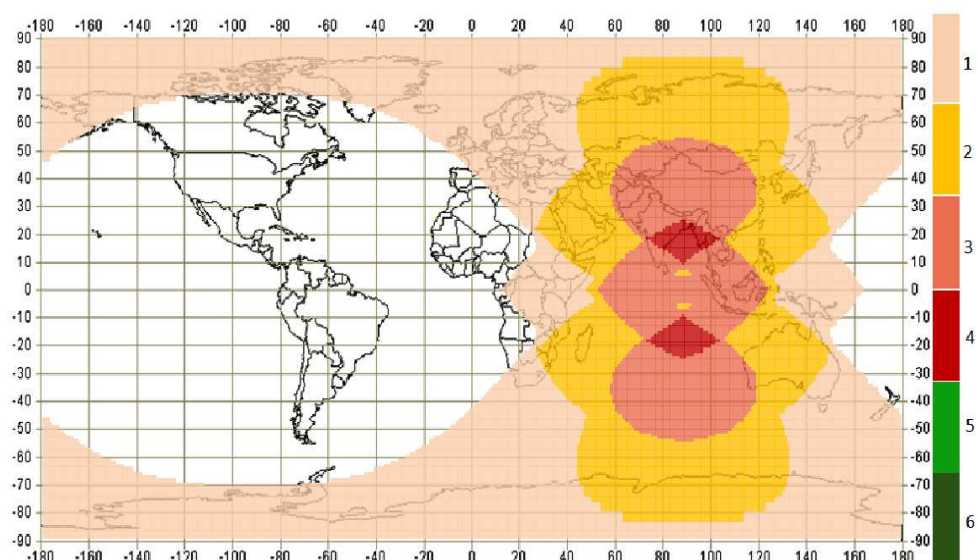


Рисунок 14 - Покрытие Земли минимальным количеством КА, обеспечиваемое ОГ из 6 КА на ГСНО (ГДВУ 70°в.д. и 110°в.д.) для угла места 25°

В таблице 10 приведены навигационные характеристики, обеспечиваемые совместно системой из ОГ ГЛОНАСС и ОГ ВКК на геосинхронных наклонных орбитах и для сравнения навигационные характеристики штатной ОГ ГЛОНАСС и модернизированных ОГ ГЛОНАСС из 30 КА (ОГ-30А, ОГ-30Б). Расчеты сделаны для территории Российской Федерации и Арктики.

Таблица 10 - Навигационные характеристики, обеспечиваемые системой из ОГ ГЛОНАСС и ОГ ВКК на ГСНО

Орбитальная группировка	PDOP \leq 2 (угол места 5°)	PDOP \leq 6 (угол места 25°)	Средний PDOP	
			(угол места 5°)	(угол места 25°)
Гло-24	83,9	67,8	1,79	16,17
ОГ-30А	96,1	82,7	1,56	7,0
ОГ-30Б	94,3	84,7	1,60	6,8
Гло-24 + 4ГСНО(1x4)	95,5	83,5	1,56	5,39
Гло-24 + 6 ГСНО(2x3)	98,3	87,7	1,48	4,64
Гло-24 + 6 ГСНО(1x6)	98,7	89	1,46	3,99

Приведенные данные показывают, что ОГ ВКК из 6 КА на геосинхронных круговых орбитах совместно с штатной ОГ системы ГЛОНАСС обеспечивают на территории России и Арктики лучшую доступность на открытой местности и в условиях ограниченной видимости, а также наименьшее среднее значение пространственного геометрического фактора PDOP чем модернизированные орбитальные группировки из 30 КА на СВО.

Обобщая варианты ОГ ВКК на геосинхронных наклонных круговых орбитах можно сделать вывод, что наибольшее покрытие территории РФ и Арктики и лучший пространственный геометрический фактор обеспечивает ОГ из 6 КА на геосинхронных наклонных орбитах, двигающиеся вдоль одной наземной трассы (ГДВУ 90° в.д.).

Орбитальная группировка из 4 КА ВКК не обеспечивает гарантированную видимость двух КА над территорией России.

2.5.3 Орбитальная группировка на орбитах типа QZSS

2.5.3.1 Орбитальная группировка на орбитах типах QZSS с двумя трассами

Для эллиптической орбиты долгота восходящих и нисходящих узлов и долгота центра подспутниковой трассы не совпадают по значению. Для идеальной эллиптической орбиты со значением аргумента перигея 270° долгота центра подспутниковой трассы будет находиться между восходящим и нисходящим узлом, и совпадать с долготой подспутниковой точки апогея. Для параметров орбит QZSS при наклонении $i=64,8^\circ$ и значении эксцентриситета $e=0,072$ расстояние между долготами восходящего и нисходящего узла будет составлять $16,37^\circ$. Таким образом, для орбит типа QZSS долгота восходящего узла КА должна быть на $8,2^\circ$ больше долготы центра подспутниковой трассы.

На рисунке 15 представлены трассы орбит типа QZSS с центром 60° и 120° по долготе.

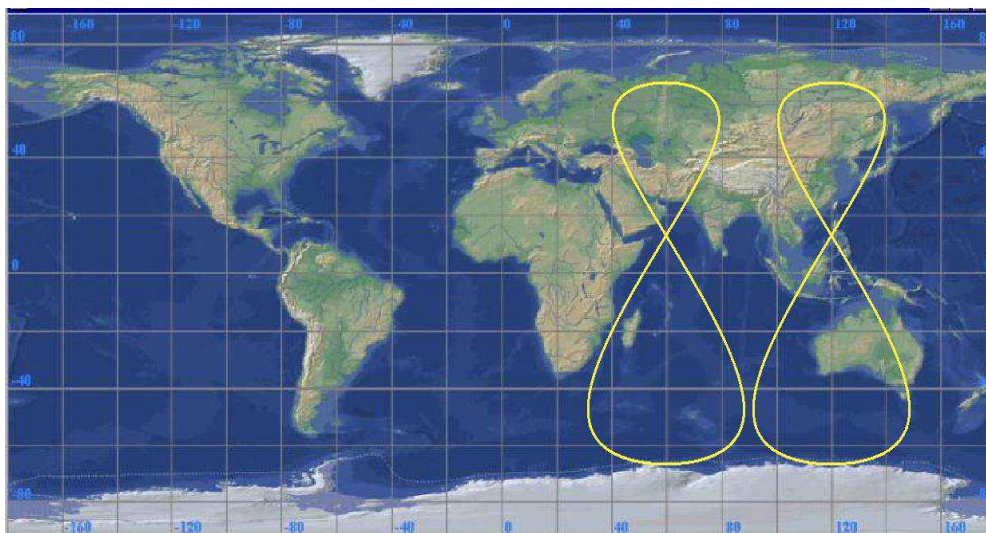


Рисунок 15 - Трасса орбит типа QZSS (центр 60° в.д. и 120° в.д.)

На рисунке 16 приведена карта покрытия территории Земли орбитальной группировкой из 6 КА на орбитах типа QZSS с двумя трассами с центром 60° и 120° по долготе. На карте видно, что на большей территории России данная ОГ обеспечивает видимость не менее трех КА. Причем границы этой зоны по долготе составляют от 24° в.д до 150° в.д. Таким образом, не захватывается крайняя восточная территория России. Смещение центральных точек трасс на долготу 70° и 130° обеспечивает лучшее покрытие территории России зоной видимости 3-х КА - рисунок 16.

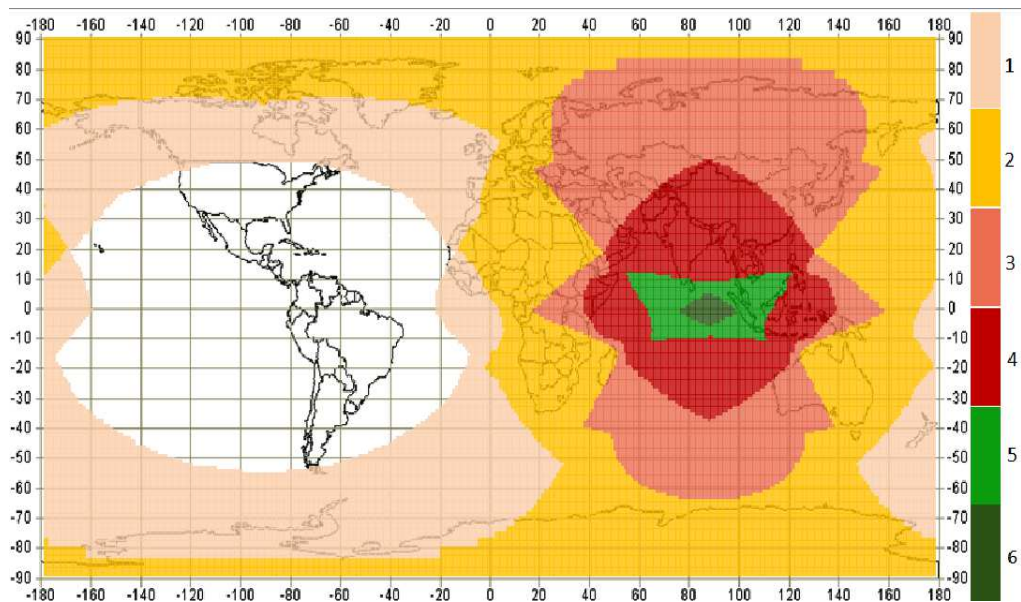


Рисунок 16 - Покрытие Земли минимальным количеством КА, обеспечиваемое ОГ из 6 КА на орбитах типа QZSS (центр 60°в.д. и 120°в.д.) для угла места 5°

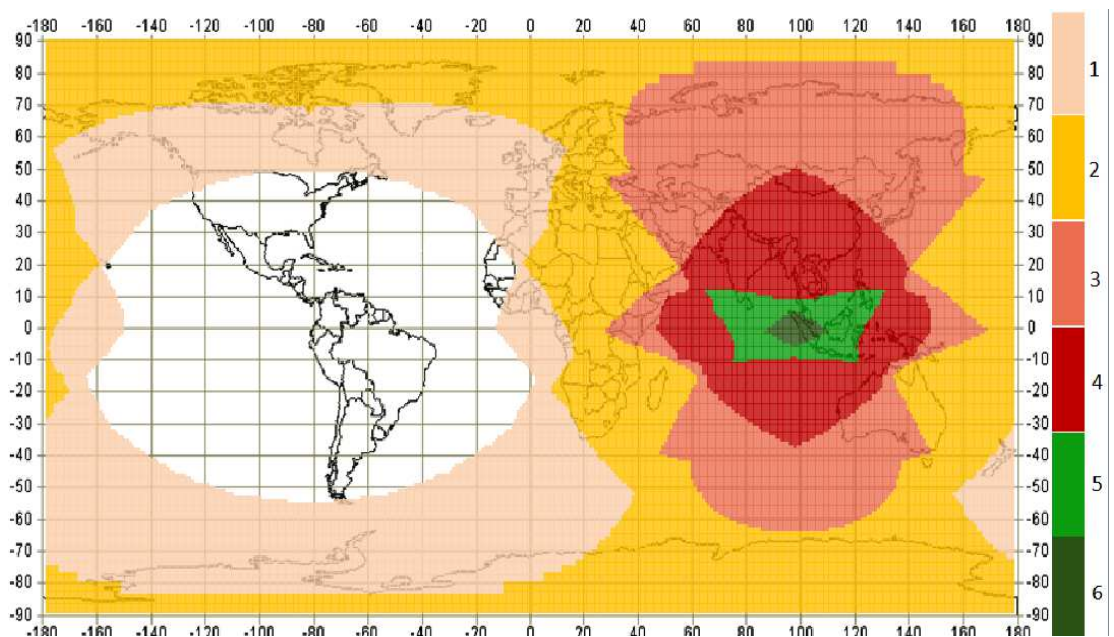


Рисунок 17 - Покрытие Земли минимальным количеством КА, обеспечиваемое ОГ из 6 КА на орбитах типа QZSS (центр 70°в.д. и 130°в.д.) для угла места 5°

ОГ из 6 КА на орбитах типа QZSS, двигающиеся по три вдоль двух трасс с центром 70°в.д. и 130°, обеспечит на территории России практически 100% видимость гарантированно двух КА и видимость трех КА $\approx 96,5\%$. Карта покрытия представлена на рисунке 17.

В городской и горной местности с ограничениями по углу места 25°ОГ из 6-ти КАQZSS, обеспечит постоянную видимость одного КА на всей территории России. Два КА будут видны с любой точки России с вероятностью 92,5%. На рисунке 18 приведена карта покрытия для угла места 25°.

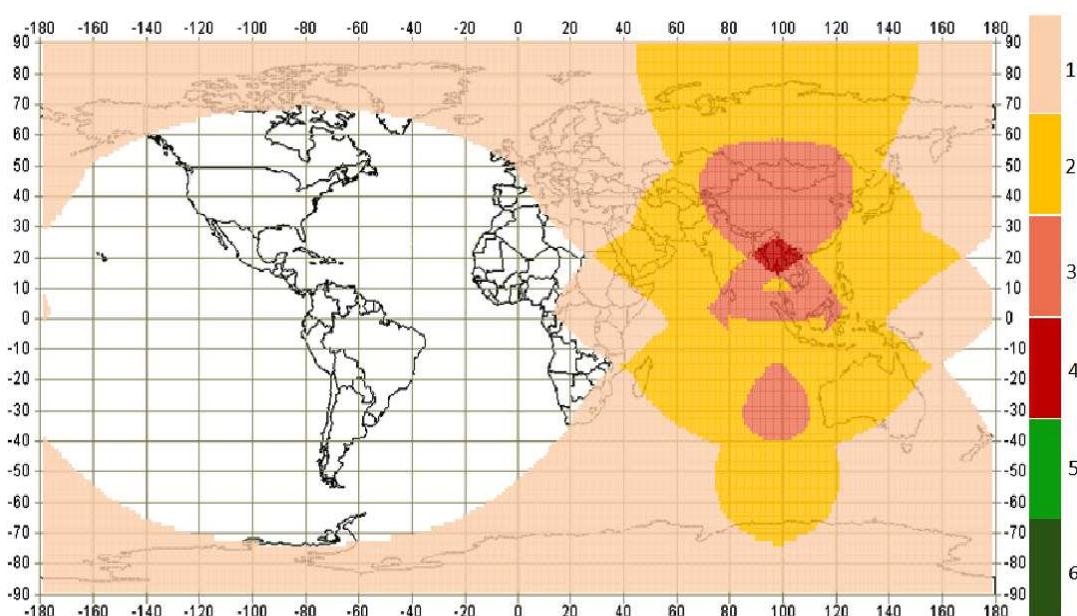


Рисунок 18 - Покрытие Земли минимальным количеством КА, обеспечиваемое ОГ из 6 КА на орбитах типа QZSS (центр 70°в.д. и 130°в.д.) для угла места 25°

Доступность по условию $PDOP \leq 2$, обеспечиваемая совместно с орбитальной группировкой ГЛОНАСС, составляет 99,1% на территории России. В городской и горной местности с ограничениями по углу места 25° доступность по условию $PDOP \leq 6$ составит 89,9%.

ОГ из 6-ти КАQZSS, двигающиеся по три КА вдоль двух наземных трасс (центр 70°в.д. и 130°в.д.), совместно с ОГ ГЛОНАСС обеспечивает на территории России среднее значение пространственного геометрического фактора PDOP=1,433. В условиях ограниченной видимости (угол места 25°) среднее значение PDOP=3,91.

Рассмотрим вариант *ОГ из 4 КА на орбитах типа QZSS*, двигающиеся по два вдоль двух трасс с центром 70° и 130°в.д. Данная ОГ обеспечит на всей территории России гарантированную видимость одного КА и видимость двух КА ≈ 97,1%. Карта покрытия представлена на рисунке ниже.

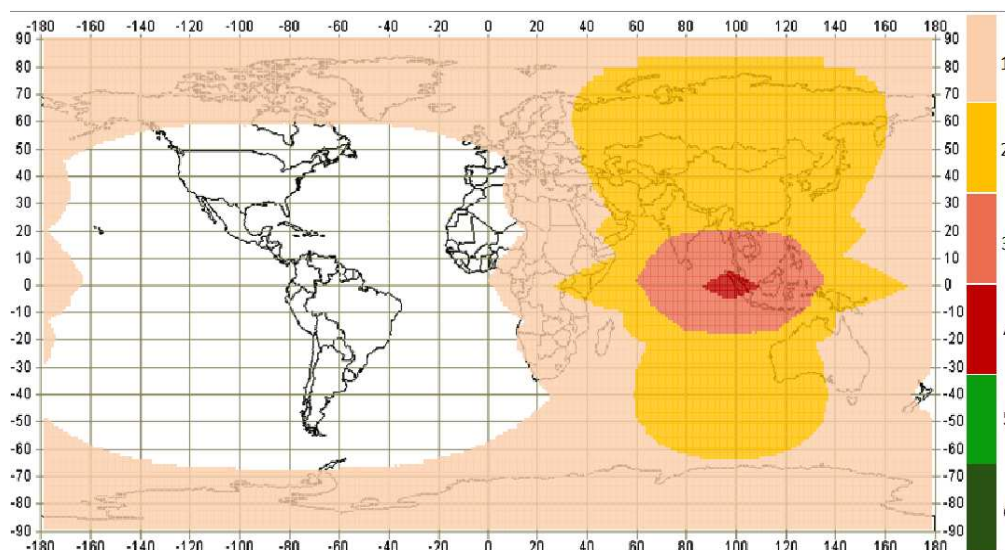


Рисунок 19 - Покрытие Земли минимальным количеством КА, обеспечиваемое ОГ из 4 КА на орбитах типа QZSS (центр 70°в.д. и 130°в.д.) для угла места 5°

В городской и горной местности с ограничениями по углу места 25°ОГ из 4-х КА обеспечит видимость одного КА - 98,6%, двух КА - 69,3%.

Доступность по условию PDOP≤2, обеспечиваемая совместно с орбитальной группировкой ГЛОНАСС, составляет 95,7% на территории России. В городской и горной местности с ограничениями по углу места 25° доступность по условию PDOP≤6 составит 83,5%.

ОГ из 4 КАQZSS, двигающиеся по два КА вдоль двух наземных трасс (центр 70° в.д. и 130° в.д.), совместно с ОГ ГЛОНАСС обеспечивает на территории России среднее значение пространственного геометрического фактора PDOP=1,55. В условиях ограниченной видимости (угол места 25°) среднее значение PDOP=5,06.

2.5.3.2 Орбитальная группировка на орбитах типа QZSS с одной трассой

Анализ орбитальной группировки из 6-ти КА на орбитах типа QZSS с одной трассой показывает улучшение характеристик видимости на территории РФ и Арктики. Так на рисунке 20 представлена карта покрытия Земли орбитальной группировкой из 6 КА на орбитах типа QZSS с одной трассой с центром 90° по долготе (угол места 5°).

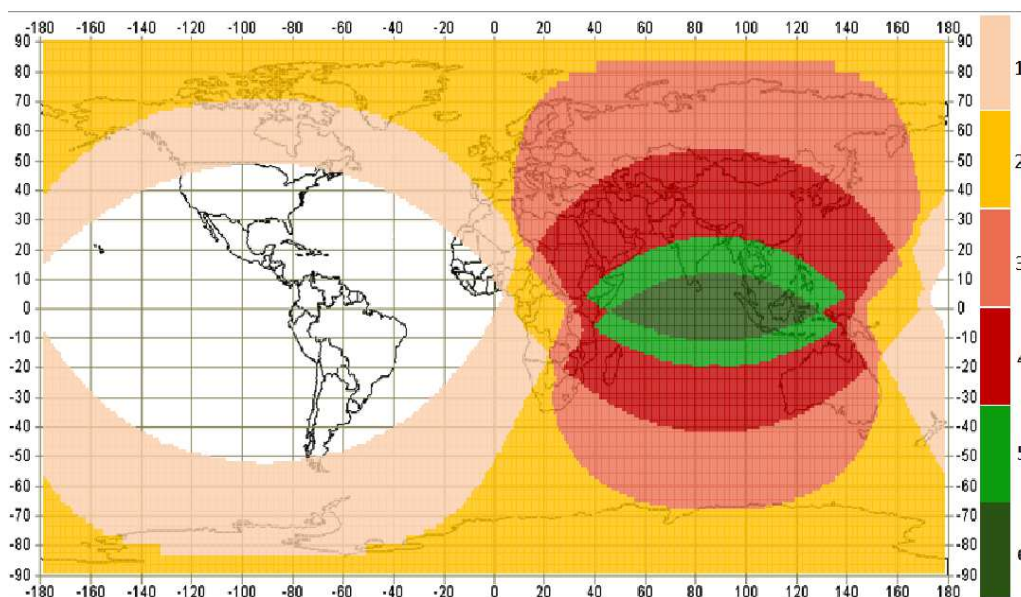


Рисунок 20 - Покрытие Земли минимальным количеством КА, обеспечиваемое ОГ из 6 КА на орбитах типа QZSS (центр 90° в.д.) для угла места 5°

На карте видно, что орбитальной группировки из 6-ти КА на орбитах типа QZSS с одной трассой обеспечивает большую площадь покрытия России бóльшим количеством КА по сравнению с ОГ типа QZSS с двумя трассами.

При этом зона покрытия минимум тремя КА не захватывает восточную территорию России. ОГ из 6 КА на орбитах типа QZSS с центром 110° по долготе обеспечивает лучшее покрытие территории России зоной из минимум трех видимых КА - рисунок 21. Подспутниковая трасса для такой ОГ ВКК приведена на рисунке 22.

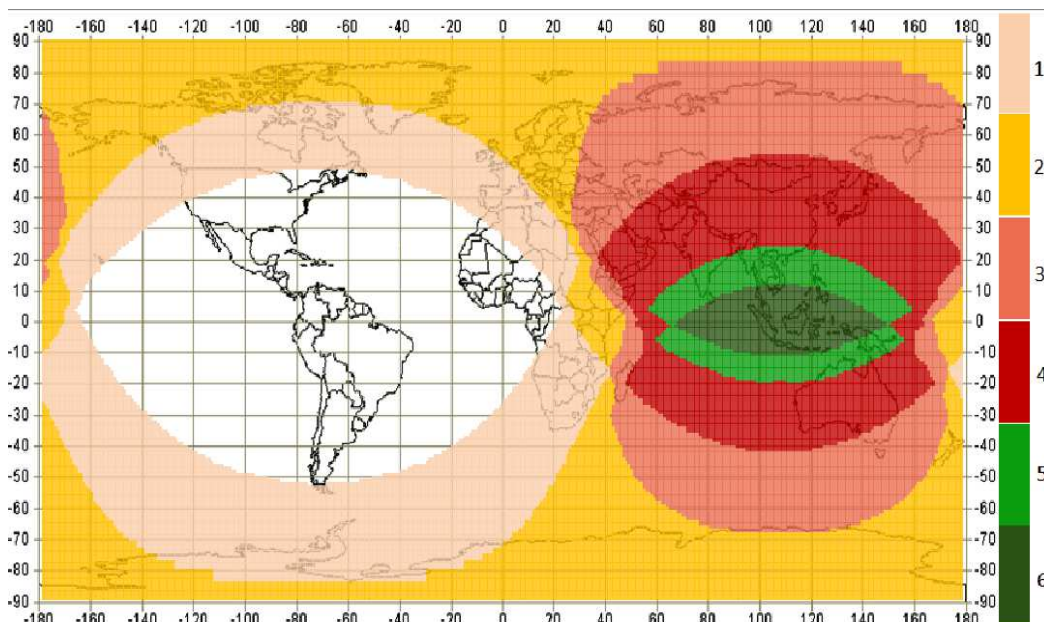


Рисунок 21 - Покрытие Земли минимальным количеством КА, обеспечиваемое ОГ из 6 КА на орбитах типа QZSS (центр 110° в.д.) для угла места 5°

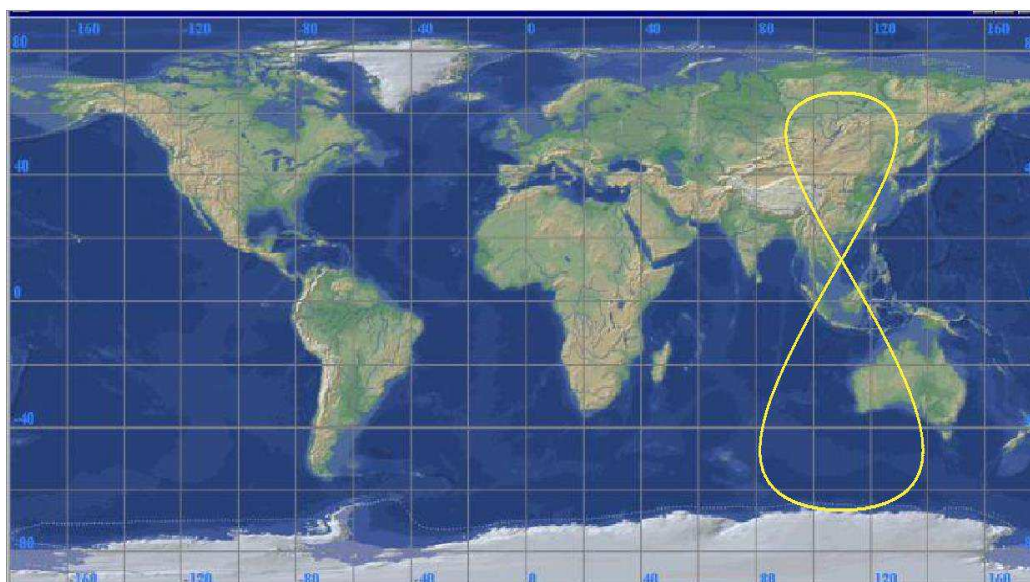


Рисунок 22 - Трасса орбит типа QZSS (центр 110°в.д.)

ОГ из 6 КА на орбитах типа QZSS, двигающиеся вдоль одной трассы, обеспечит на территории России 100% видимость двух КА и видимость трех КА $\approx 98,8\%$.

В городской и горной местности с ограничениями по углу места 25° ОГ из 6-ти КА QZSS с одной трассой (центр 110° в.д.) обеспечит постоянную видимость одного КА на всей территории России. Два КА будут видны с любой точки России с вероятностью $97,8\%$ (рисунок 23).

Доступность по условию $PDOP \leq 2$, обеспечиваемая ОГ из 6-ти КА QZSS с одной трассой совместно с орбитальной группировкой ГЛОНАСС, составляет 99% на территории России. В городской и горной местности с ограничениями по углу места 25° доступность по условию $PDOP \leq 6$ составит $90,1\%$.

ОГ из 6-ти КА QZSS совместно с ОГ ГЛОНАСС обеспечивает на территории России среднее значение пространственного геометрического фактора $PDOP=1,44$. В условиях ограниченной видимости (угол места 25°) среднее значение $PDOP=3,69$.

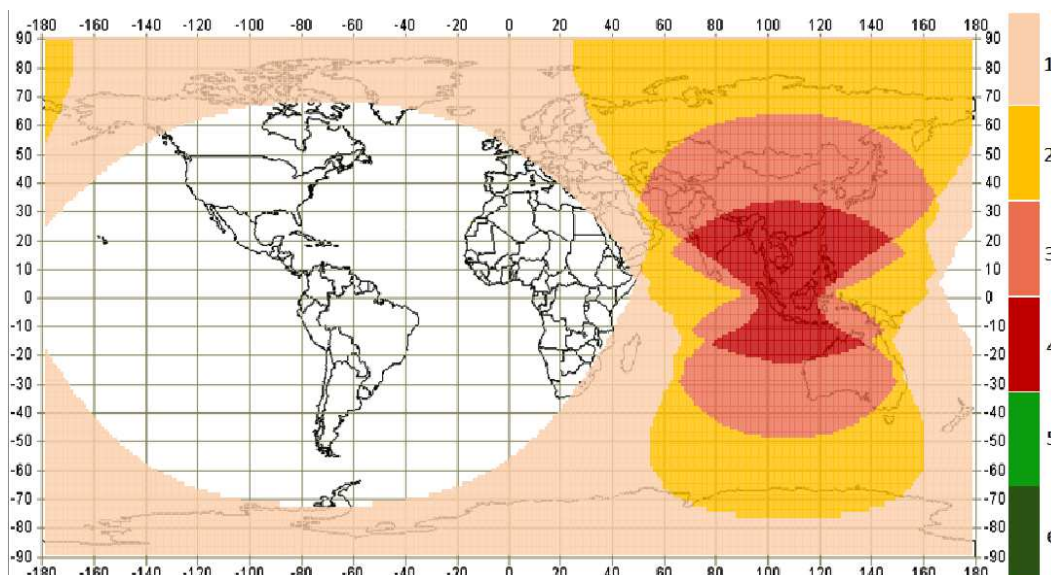


Рисунок 23 - Покрытие Земли минимальным количеством КА, обеспечиваемое ОГ из 6 КА на орбитах типа QZSS (центр 110°в.д.) для угла места 25°

Вариант *однотрассовой ОГ из 4 КА на орбитах типа QZSS* с центром 110°в.д. обеспечит на всей территории России гарантированную видимость одного КА и видимость двух КА $\approx 99,8\%$ (рисунок 24). В городской и горной местности с ограничениями по углу места 25° однотрассовая ОГ из 4-х КА обеспечит видимость одного КА - 99,9%, двух - 75,8%.

Однотрассовая ОГ из 4 КА QZSS совместно с орбитальной группировкой ГЛОНАСС обеспечивает

- доступность по условию $PDOP \leq 2$ на открытой местности — 96,1%
- среднее значение PDOP на открытой местности — 1,54
- доступность в городской и горной местности с ограничениями по углу места 25° по условию $PDOP \leq 6$ — 84,1%
- среднее значение PDOP с ограничениями по углу места 25° — 4,67

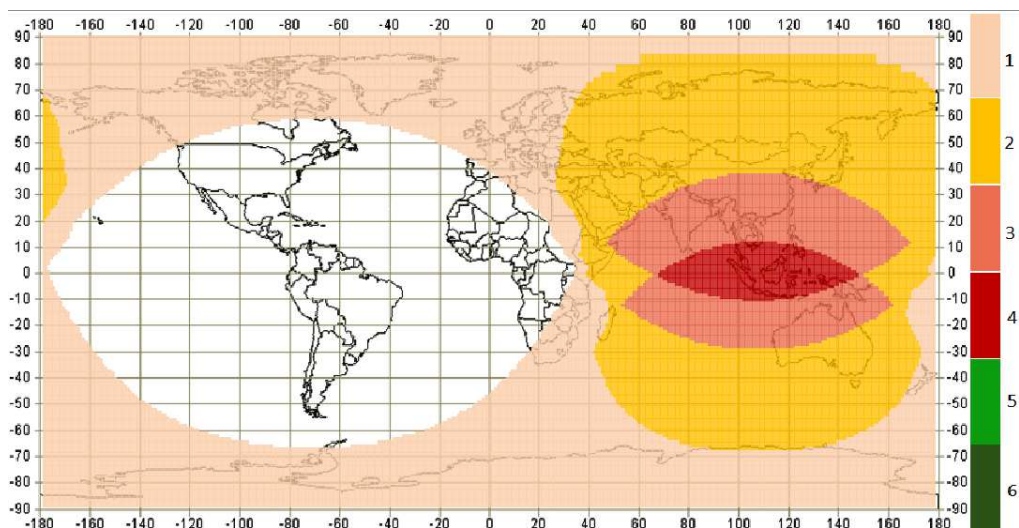


Рисунок 24 - Покрытие Земли минимальным количеством КА, обеспечиваемое однотрассовой ОГ из 4 КА на орбитах типа QZSS (центр 110°в.д.) для угла места 5°

В таблицах 11-12 приведена вероятность видимости на территории России для угла места 5° и 25°, обеспечиваемая ОГ ВКК из 4 и 6 КА на орбитах типа QZSS с одной (центр 110°в.д.) и двумя трассами (центр 70°в.д. и 130°в.д.).

Таблица 11 - Видимость на территории России, обеспечиваемая ОГ ВКК из 4 КА на орбитах типа QZSS

Вероятность	для угла места 5°		для угла места 25°	
	4QZSS (2x2)	4QZSS (1x4)	4QZSS (2x2)	4QZSS (1x4)
Видимость одного КА	100	100	98,6	99,9
Видимость двух КА	97,1	99,8	69,3	75,8

Таблица 12 - Видимость на территории России, обеспечиваемая ОГ ВКК из 6 КА на орбитах типа QZSS

Вероятность	для угла места 5°		для угла места 25°	
	6 QZSS (2x3)	6 QZSS (1x6)	6 QZSS (2x3)	6 QZSS (1x6)
Видимость одного КА	100	100	100	100
Видимость двух КА	99,99	100	92,5	97,8
Видимость трех КА	96,6	98,8	59,7	63,0

В таблице 13 приведены навигационные характеристики, обеспечиваемые совместно системой из ОГ ГЛОНАСС и ОГ ВКК на орбитах типа QZSS. Для сравнения приведены навигационные характеристики штатной ОГ ГЛОНАСС и модернизированных ОГ ГЛОНАСС из 30 КА (ОГ-30А, ОГ-30Б). Расчеты сделаны для территории Российской Федерации и Арктики.

Таблица 13 - Навигационные характеристики, обеспечиваемые системой из ОГ ГЛОНАСС и ОГ ВКК на орбитах типа QZSS

Орбитальная группировка	PDOP \leq 2 (угол места 5°)	PDOP \leq 6 (угол места 25°)	Средний PDOP	
			(угол места 5°)	(угол места 25°)
Гло-24	83,9	67,8	1,79	16,17
ОГ-30А	96,1	82,7	1,56	7,0
ОГ-30Б	94,3	84,7	1,60	6,8
Гло-24 + 4 QZSS (2x2)	95,7	83,5	1,55	5,06
Гло-24 + 4QZSS (1x4)	96,1	84,1	1,54	4,67
Гло-24 + 6 QZSS (2x3)	99,1	89,9	1,43	3,91
Гло-24 + 6 QZSS (1x6)	99	90,1	1,44	3,69

Обобщая варианты ОГ ВКК на орбитах типа QZSS можно сделать

вывод:

– наибольшее покрытие территории РФ и Арктики обеспечивает ОГ из 6 КА, двигающиеся вдоль одной наземной трассы с центром 110° по долготе;

– ОГ из 6 КА, двигающиеся вдоль одной наземной трассы, совместно с ОГ ГЛОНАСС из 24 КА обеспечивает лучший средний пространственный геометрический фактор в условиях ограниченной видимости на территории России;

– орбитальная группировка из 4 КА ВКК на орбитах типа QZSS не обеспечивает гарантированную видимость двух КА над территорией России.

2.5.4 Орбитальная группировка высокоорбитального комплекса на орбитах М15

2.5.4.1 Орбитальная группировка на орбитах М15 с двумя трассами

Для параметров орбит М15 при наклонении $i=64,8^\circ$ и значении эксцентриситета $e=0,15$ расстояние между долготами восходящего и нисходящего узла будет составлять $\approx 30^\circ$. Таким образом, для орбит М15 долгота восходящего узла КА должна быть на 15° больше долготы центра подспутниковой трассы.

На рисунке 25 представлены трассы орбит М15 с центром 70° и 130° по долготе.

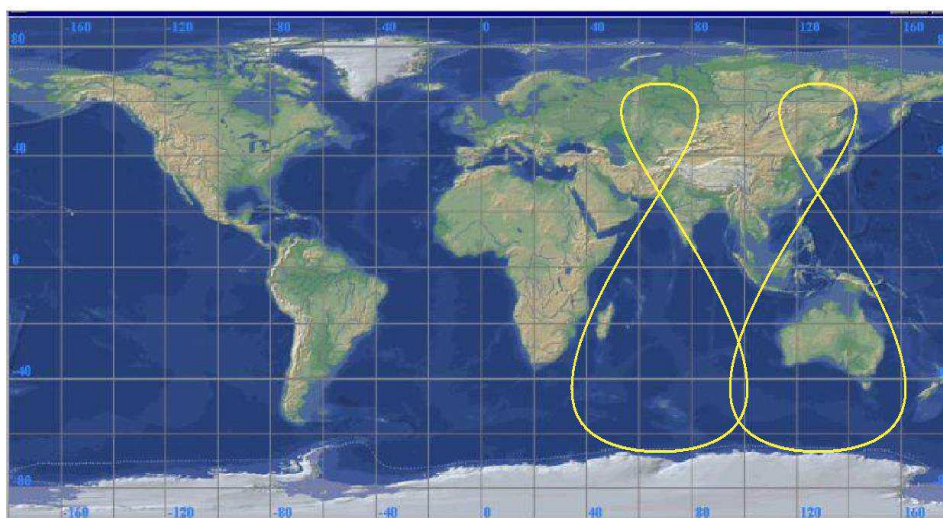


Рисунок 25 - Трасса орбит М15 (центр 70° в.д. и 130° в.д.)

На рисунке 26 приведена карта покрытия территории Земли орбитальной группировкой из 6 КА на орбитах М15 с двумя трассами с центром 70° и 130° по долготе. На карте видно, что практически вся территории России гарантированно покрыта тремя КА (99,3%). Но еще более оптимальной является ОГ с двумя смещенными на восток трассами с

центром 75° и 135° по долготе. Карта покрытия территории Земли такой ОГ приведена на рисунке 27.

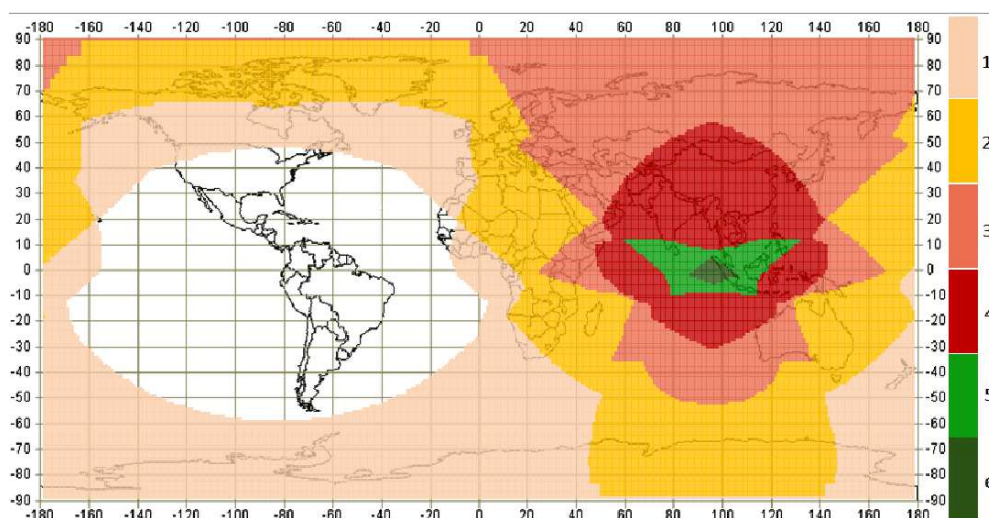


Рисунок 26 - Покрытие Земли минимальным количеством КА, обеспечиваемое ОГ из 6 КА на орбитах М15 (центр 70° в.д. и 130° в.д.) для угла места 5°

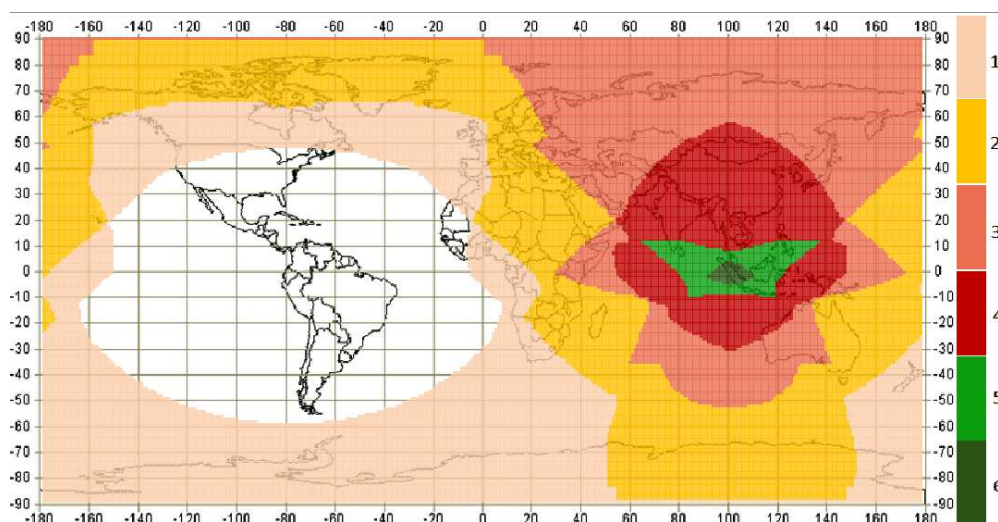


Рисунок 27 - Покрытие Земли минимальным количеством КА, обеспечиваемое ОГ из 6 КА на орбитах М15 (центр 75° в.д. и 135° в.д.) для угла места 5°

ОГ из 6 КА на орбитах М15, двигающиеся по три вдоль двух трасс с центром 75° в.д. и 135° , обеспечит на территории России видимость гарантированно трех КА 99,7%.

В городской и горной местности с ограничениями по углу места 25° ОГ из 6-ти КА М15 обеспечит постоянную видимость одного КА на всей территории России. Два КА будут видны с любой точки России с вероятностью 96,3%, три КА - с вероятностью 73,1%. На рисунке 28 приведена карта покрытия для угла места 25° .

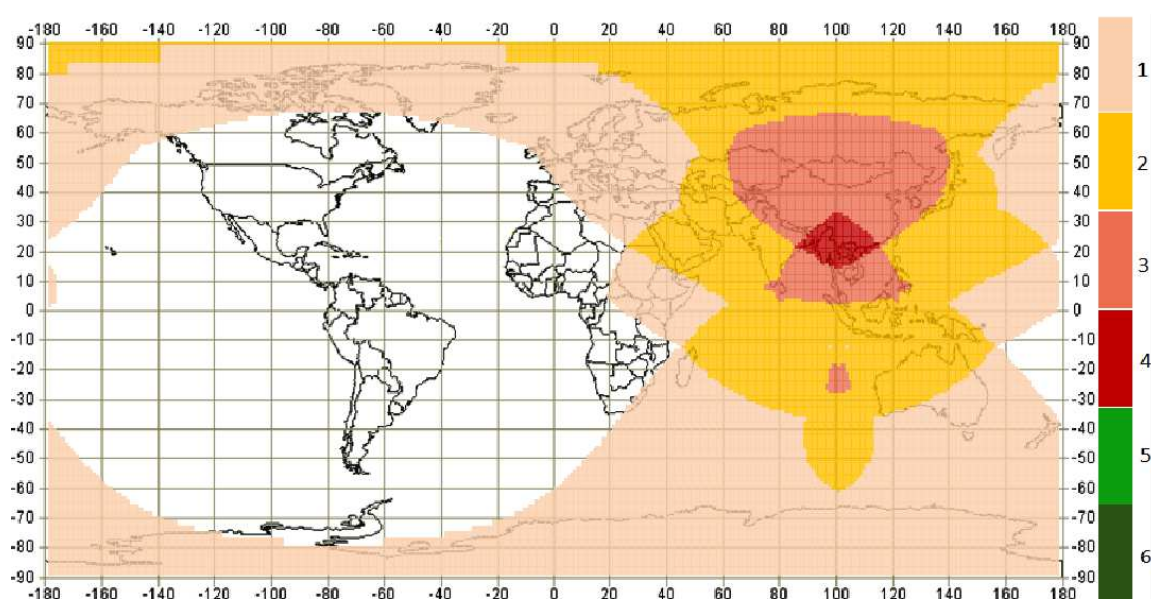


Рисунок 28 - Покрытие Земли минимальным количеством КА, обеспечиваемое ОГ из 6 КА на орбитах М15 (центр 75° в.д. и 135° в.д.) для угла места 25°

Доступность по условию $PDOP \leq 2$, обеспечиваемая совместно с орбитальной группировкой ГЛОНАСС, составляет 99,3% на территории России. В городской и горной местности с ограничениями по углу места 25° доступность по условию $PDOP \leq 6$ составит 91,8%.

Двухтрассовая ОГ из 6-ти КА М15 совместно с ОГ ГЛОНАСС обеспечивает на территории России среднее значение пространственного

геометрического фактора $PDOP=1,40$. В условиях ограниченной видимости (угол места 25°) среднее значение $PDOP=3,65$.

Рассмотрим вариант *ОГ* из 4 КА на орбитах *M15*, двигающиеся по два вдоль двух трасс с центром 75° и 135° в.д. Данная *ОГ* обеспечит на всей территории России гарантированную видимость одного КА - 100% и видимость двух КА $\approx 99,5\%$. Карта покрытия представлена на рисунке ниже.

В городской и горной местности с ограничениями по углу места 25° *ОГ* из 4-х КА обеспечит видимость одного КА - 99,1%, двух КА - 80,2%.

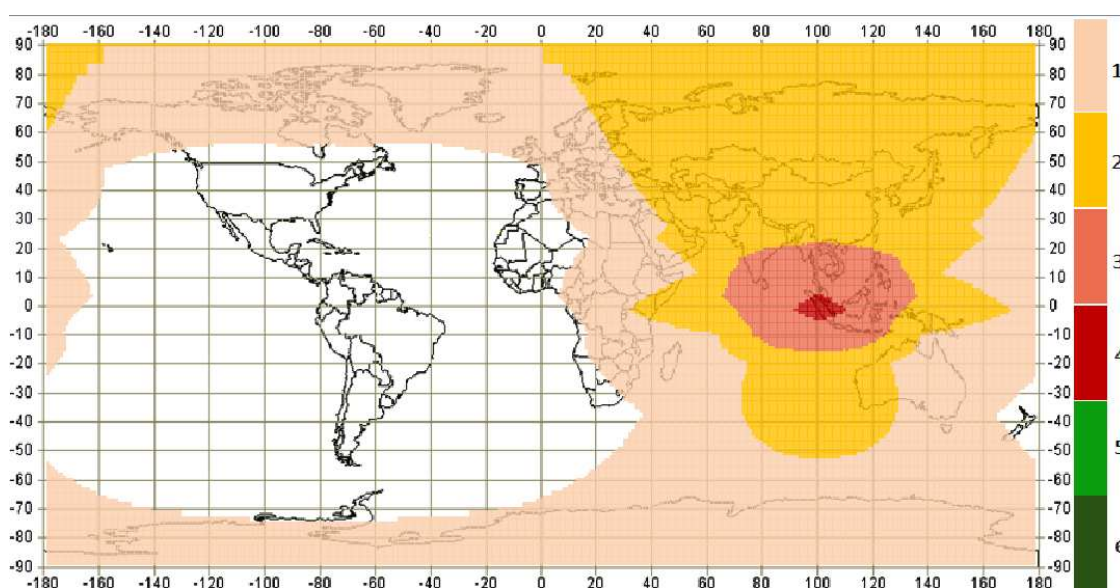


Рисунок 29 - Покрытие Земли минимальным количеством КА, обеспечиваемое *ОГ* из 4 КА на орбитах *M15* (центр 75° в.д. и 135° в.д.) для угла места 5°

Доступность по условию $PDOP \leq 2$, обеспечиваемая совместно с орбитальной группировкой ГЛОНАСС, составляет 97% на территории России. В городской и горной местности с ограничениями по углу места 25° доступность по условию $PDOP \leq 6$ составит 85%.

Двухтрассовая *ОГ* из 4 КА на орбитах *M15* совместно с *ОГ* ГЛОНАСС обеспечивает на территории России среднее значение пространственного

геометрического фактора PDOP=1,53. В условиях ограниченной видимости (угол места 25°) среднее значение PDOP=4,75.

2.5.4.2 Орбитальная группировка на орбитах М15 с одной трассой

На рисунке 30 представлена карта покрытия Земли орбитальной группировкой из 6 КА на орбитах М15 с одной трассой с центром 105° по долготе.

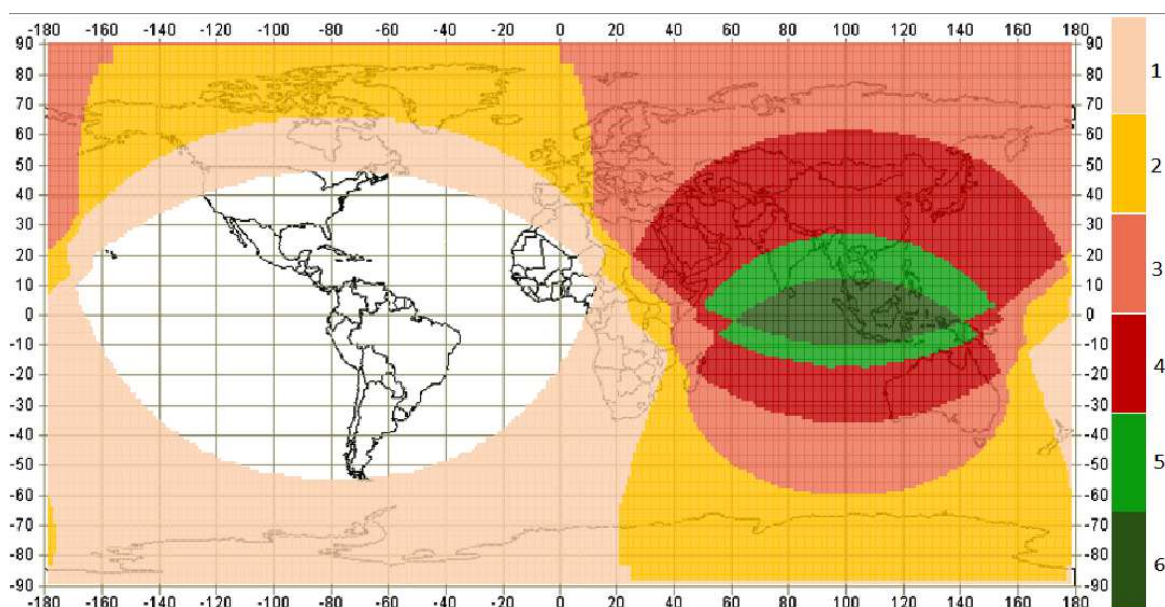


Рисунок 30 - Покрытие Земли минимальным количеством КА, обеспечиваемое ОГ из 6 КА на М15 (центр 105°в.д.) для угла места 5°

На карте видно, что однотрассовая орбитальной группировки из 6-ти КА на орбитах М15 обеспечивает покрытия России бóльшим количеством КА по сравнению с ОГ М15 с двумя трассами.

Зона покрытия гарантированно тремя КА закрывает всю территорию России и Арктики. Отображено на рисунке 30.

В городской и горной местности с ограничениями по углу места 25° ОГ из 6-ти КА М15 с одной трассой (центр 105°в.д.) обеспечит постоянную

видимость одного КА на всей территории России. Два КА будут видны с любой точки России с вероятностью 98,5% - рисунок 31.

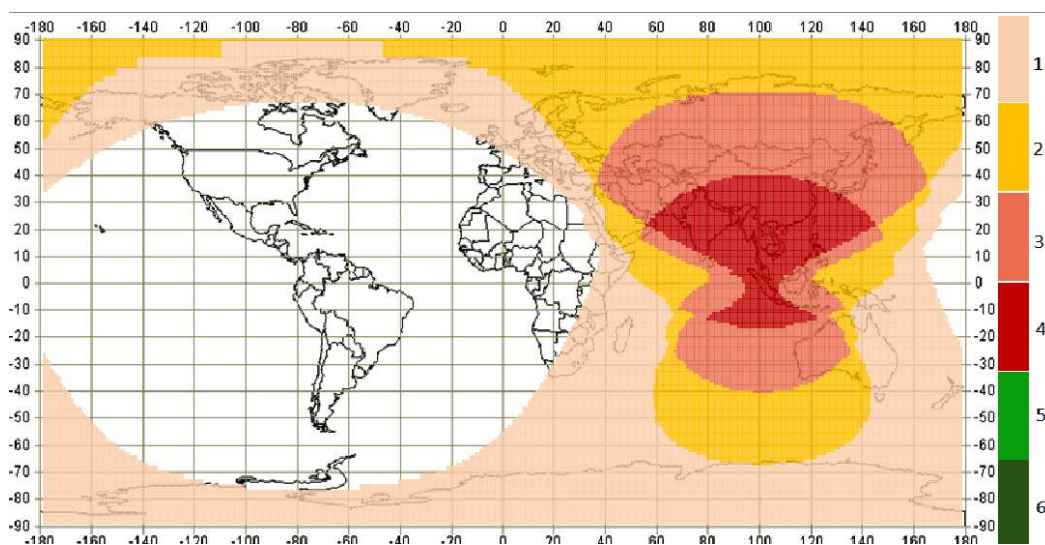


Рисунок 31 - Покрытие Земли минимальным количеством КА, обеспечиваемое ОГ из 6 КА на М15 (центр 105°в.д.) для угла места 25°

Доступность по условию $PDOP \leq 2$, обеспечиваемая однотрассовой ОГ из 6-ти КА на орбитах М15 совместно с орбитальной группировкой ГЛОНАСС, составляет 98,3% на территории России. В городской и горной местности с ограничениями по углу места 25° доступность по условию $PDOP \leq 6$ составит 89,7%.

ОГ из 6-ти КА М15 совместно с ОГ ГЛОНАСС обеспечивает на территории России среднее значение пространственного геометрического фактора $PDOP=1,44$. В условиях ограниченной видимости среднее значение $PDOP=3,61$.

Вариант однотрассовой ОГ из 4 КА на орбитах М15 с центром 105°в.д. обеспечит на всей территории России гарантированную видимость двух КА (рисунок 32). В городской и горной местности с ограничениями по углу места 25° однотрассовая ОГ из 4-х КА обеспечит видимость одного КА 99,9%, двух КА - 85%.

Однотрассовая ОГ из 4 КА М15 совместно с орбитальной группировкой ГЛОНАСС обеспечивает

- доступность по условию $PDOP \leq 2$ на открытой местности — 96,5%
- среднее значение PDOP на открытой местности — 1,54
- доступность в городской и горной местности с ограничениями по углу места 25° по условию $PDOP \leq 6$ — 84,9%
- среднее значение PDOP с ограничениями по углу места 25° — 4,35

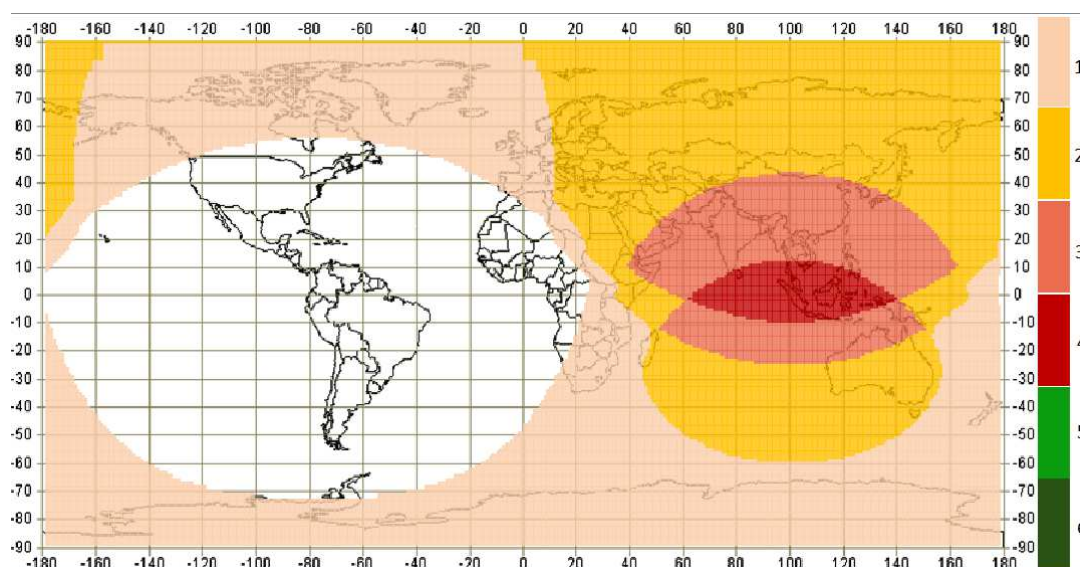


Рисунок 32 - Покрытие Земли минимальным количеством КА, обеспечиваемое однотрассовой ОГ из 4 КА на орбитах М15 (центр 105° в.д.) для угла места 5°

В таблицах 14-15 приведена вероятность видимости на территории России для угла места 5° и 25° , обеспечиваемая ОГ ВКК из 4 и 6 КА на орбитах М15 с одной (центр 105° в.д.) и двумя трассами (центр 75° в.д. и 135° в.д.).

Таблица 14 - Видимость на территории России, обеспечиваемая ОГ ВКК из 4 КА на орбитах М15

Вероятность	для угла места 5°		для угла места 25°	
	4М15 (2x2)	4М15 (1x4)	4М15 (2x2)	4М15 (1x4)
Видимость одного КА	100	100	99,1	99,9
Видимость двух КА	99,5	100	80,2	85

Таблица 15 - Видимость на территории России, обеспечиваемая ОГ ВКК из 6 КА на орбитах М15

Вероятность	для угла места 5°		для угла места 25°	
	6 М15 (2x3)	6 М15 (1x6)	6 М15 (2x3)	6 М15 (1x6)
Видимость одного КА	100	100	100	100
Видимость двух КА	100	100	96,3	98,5

В таблице 16 приведены навигационные характеристики, обеспечиваемые совместно системой из ОГ ГЛОНАСС и ОГ ВКК на орбитах М15.

Таблица 16 - Навигационные характеристики, обеспечиваемые системой из ОГ ГЛОНАСС и ОГ ВКК на орбитах М15

Орбитальная группировка	PDOP _{≤2} (угол места 5°)	PDOP _{≤6} (угол места 25°)	Средний PDOP	
			(угол места 5°)	(угол места 25°)
Гло-24	83,9	67,8	1,79	16,17
ОГ-30А	96,1	82,7	1,56	7
ОГ-30Б	94,3	84,7	1,60	6,8
Гло-24 + 4 М15 (2x2)	97	85	1,53	4,75
Гло-24 + 4М15 (1x4)	96,5	84,9	1,54	4,35
Гло-24 + 6 М15 (2x3)	99,3	91,8	1,40	3,65
Гло-24 + 6 М15 (1x6)	98,3	89,7	1,44	3,61

Анализ вариантов ОГ ВКК на орбитах М15 показал, что наибольшее покрытие территории РФ и Арктики обеспечивает ОГ из 6 КА, двигающиеся вдоль одной наземной трассы с центром 105° по долготе, но лучшие характеристики совместно с ОГ ГЛОНАСС обеспечивает двухтрассовая ОГ из 6 КА.

2.5.5 Орбитальная группировка высокоорбитального космического комплекса на орбитах типа «Тундра»

2.5.5.1 ОГ на орбитах типа «Тундра» с двумя трассами

Для параметров орбит типа «Тундра» при наклонении $i=64,8^\circ$ и значении эксцентриситета $e=0,335$ расстояние между долготами восходящего и нисходящего узла будет составлять $75,2^\circ$. Таким образом, для орбит типа «Тундра» долгота восходящего узла КА должна быть на $37,6^\circ$ больше долготы центра подспутниковой трассы.

На рисунке 33 представлены трассы орбит типа «Тундра» с центром 70° и 130° по долготе.

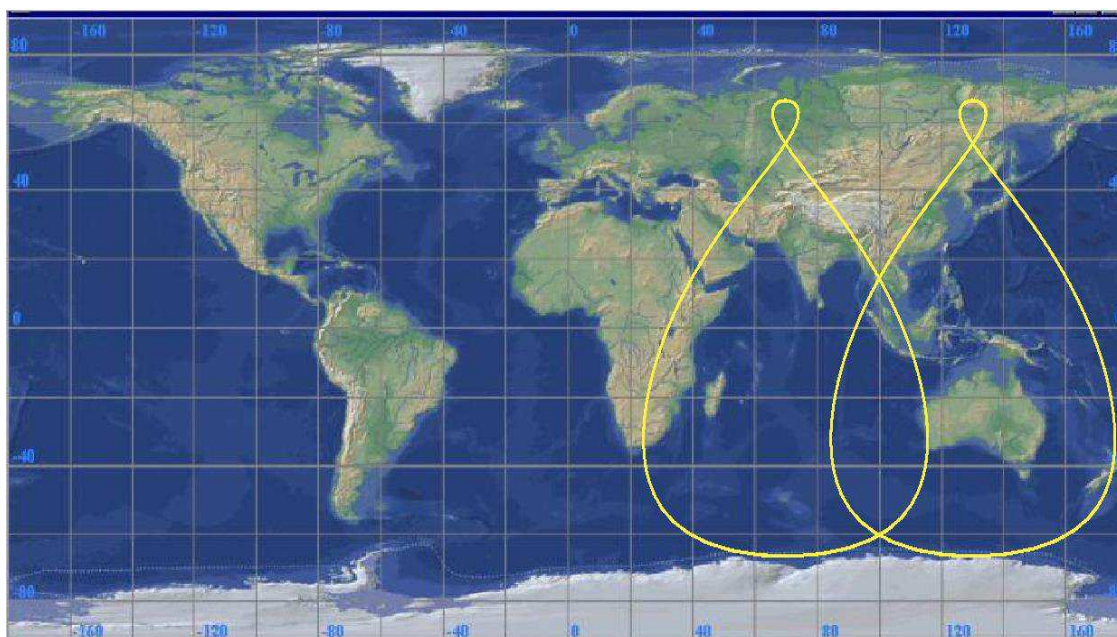


Рисунок 33 - Трасса орбит типа «Тундра» (центр 70° в.д. и 130° в.д.)

Карта покрытия территории Земли (рисунок 34) показывает, что орбитальная группировка из 6 КА на орбитах типа «Тундра» с двумя подспутниковыми трассами с центром 70° и 130° по долготе покрывает всю

территорию России, Арктики и Европу гарантированно тремя КА ВКК. Четыре КА ВКК будут видны на территории РФ - 80,3%.

В ходе исследований рассматривался вариант ОГ с центром наземных трасс 60° и 120° по долготе. Но этот вариант орбитальной группировки менее подходит для покрытия территории России.

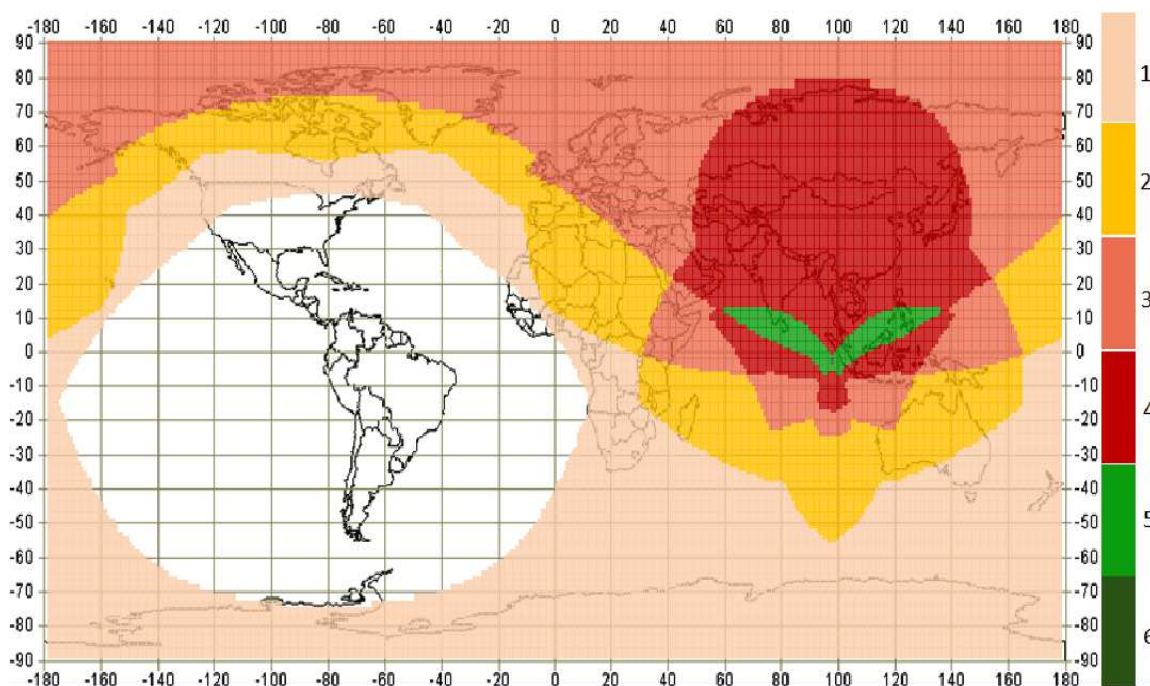


Рисунок 34 - Покрытие Земли минимальным количеством КА, обеспечиваемое ОГ из 6 КА на орбитах типа «Тундра» (центр 70° в.д. и 130° в.д.) для угла места 5°

В условиях ограниченной видимости по углу места 25° ОГ из 6-ти КА «Тундра» обеспечит видимость (рисунок 35) на территории России

- одного КА - с вероятностью 100%;
- двух КА - с вероятностью 99,2%;
- трех КА - с вероятностью 88,8%;
- четырех КА - с вероятностью 45,1%.

Доступность по условию $PDOP \leq 2$, обеспечиваемая ОГ из 6-ти КА «Тундра» с двумя трассами совместно с орбитальной группировкой

ГЛОНАСС, составляет 99,9% на территории России. В городской и горной местности с ограничениями по углу места 25° доступность по условию $PDOP \leq 6$ составит 93,8%.

ОГ из 6-ти КА «Тундра» совместно с ОГ ГЛОНАСС обеспечивает на территории России среднее значение пространственного геометрического фактора $PDOP=1,38$. В условиях ограниченной видимости (угол места 25°) среднее значение $PDOP=3,35$.

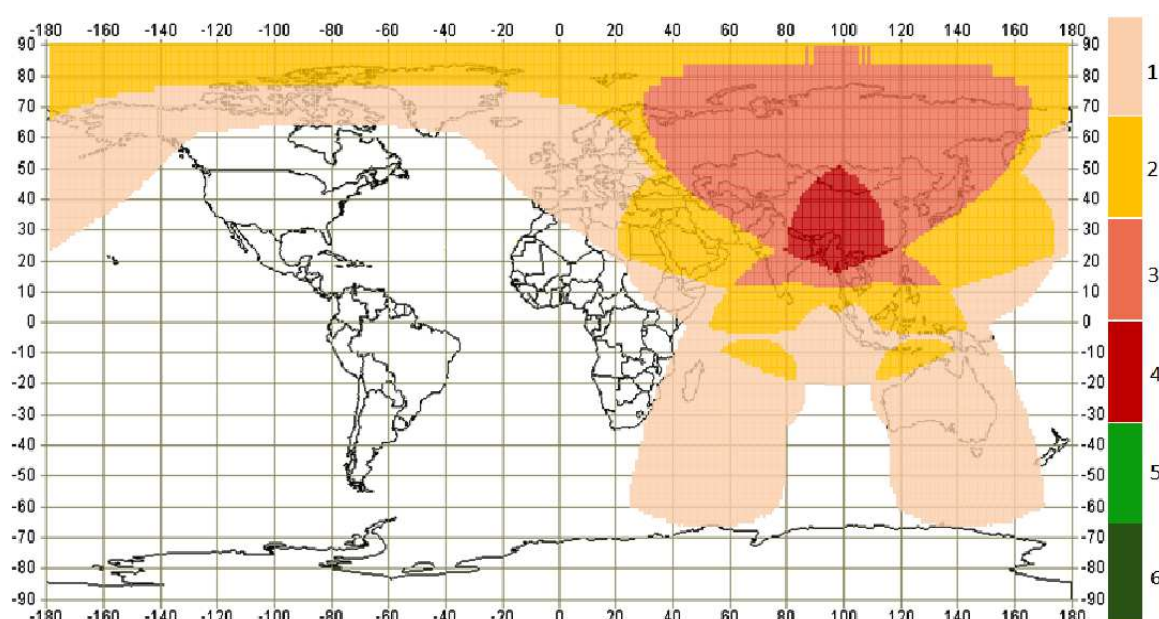


Рисунок 35 - Покрытие Земли минимальным количеством КА, обеспечиваемое ОГ из 6 КА на орбитах типа «Тундра» (центр 70° в.д. и 130° в.д.) для угла места 25°

Анализ показывает, что орбитальная группировка из 6 КА на орбитах типа «Тундра» обеспечивает видимость 3 КА на всей территории России для угла места 5° и гарантированную видимость 4 КА на значительной части России.

Рассмотрим вариант *орбитальной группировки на орбитах «Тундра» из 4-х КА*,двигающиеся по два вдоль двух трасс с центром 70° и 130° по

долготе. Карты покрытия Земли минимально гарантированным количеством КА приведены для углов места 5° и 25° на рисунках 36,37.

Вариант двухтрассовой ОГ из 4 КА на орбитах типа «Тундра» обеспечит на всей территории России практически гарантированную видимость двух КА. В городской и горной местности с ограничениями по углу места 25° двухтрассовая ОГ из 4-х КА обеспечит видимость одного КА 99,2%, двух КА 92,8%.

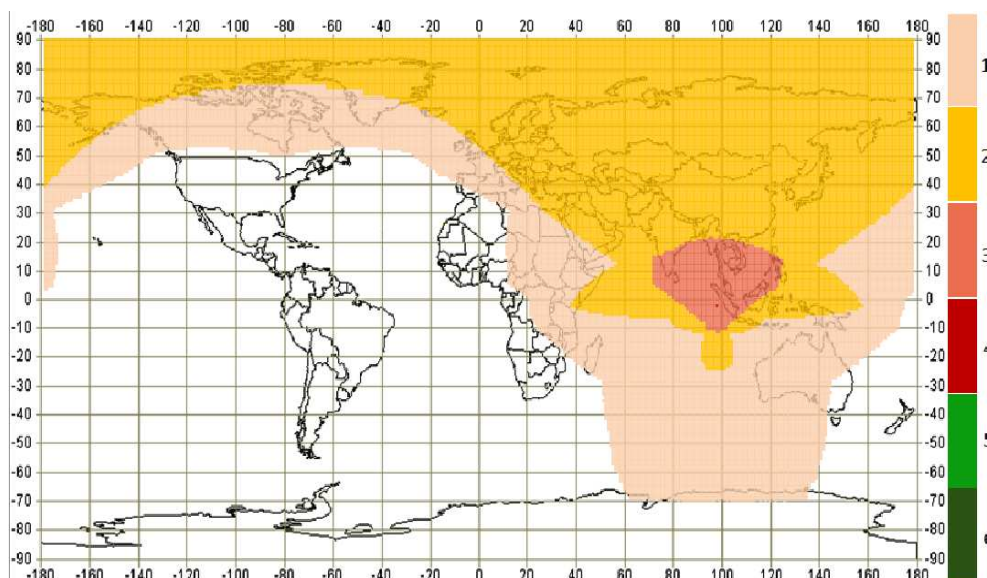


Рисунок 36 - Покрытие Земли минимальным количеством КА, обеспечиваемое ОГ из 4 КА на орбитах типа «Тундра» (центр 70° в.д. и 130° в.д.) для угла места 5°

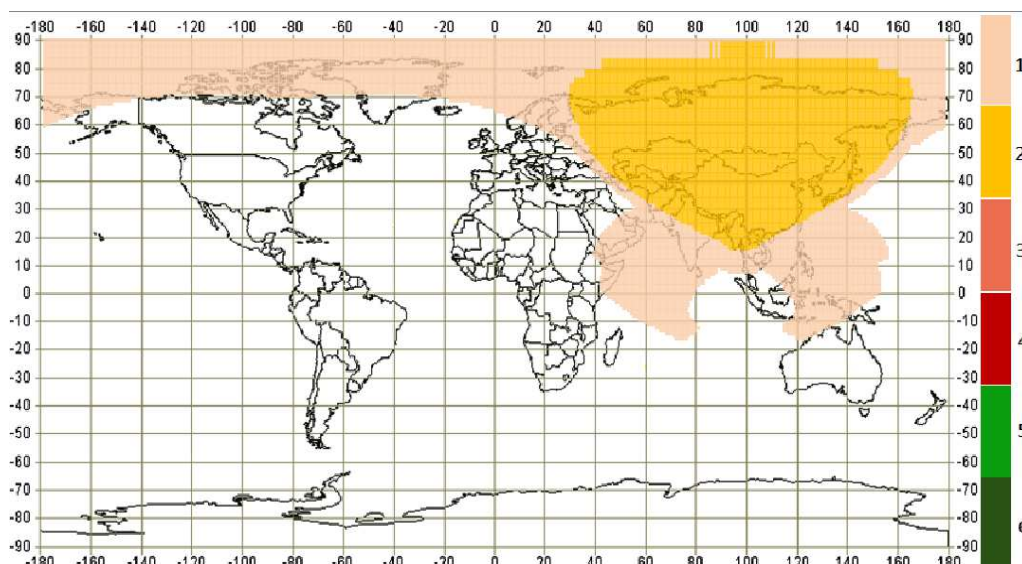


Рисунок 37 - Покрытие Земли минимальным количеством КА, обеспечиваемое ОГ из 4 КА на орбитах типа «Тундра» (центр 70°в.д. и 130°в.д.) для угла места 25°

Двухтрассовая ОГ из 4 КА «Тундра» совместно с орбитальной группировкой ГЛОНАСС обеспечивает

- доступность по условию $PDOP \leq 2$ на открытой местности — 98,6%
- среднее значение PDOP на открытой местности — 1,49
- доступность в городской и горной местности с ограничениями по углу места 25° по условию $PDOP \leq 6$ — 88,4%
- среднее значение PDOP с ограничениями по углу места 25° — 4,57

2.5.5.2 Орбитальная группировка на орбитах типа «Тундра» с одной трассой

ОГ на орбитах типа «Тундра» из 6-ти КА, двигающиеся равномерно вдоль одной трассы с центром 100° по долготе, обеспечит на территории России постоянную гарантированную видимость трех КА и гарантированную видимость четырех КА $\approx 97,5\%$. Трасса орбиты типа «Тундра» с центром

100° приведена на рисунке 38. Карта покрытия Земли минимально гарантированным количеством КА – на рисунке 39.

В городской и горной местности с ограничениями по углу места 25°ОГ из 6-ти КА «Тундра» с одной трассой обеспечит видимость (рисунок 40) на территории России

- одного КА - с вероятностью 99,91%;
- двух КА - с вероятностью 99,4%;
- трех КА - с вероятностью 97,6%;
- трех КА - с вероятностью 60,9%

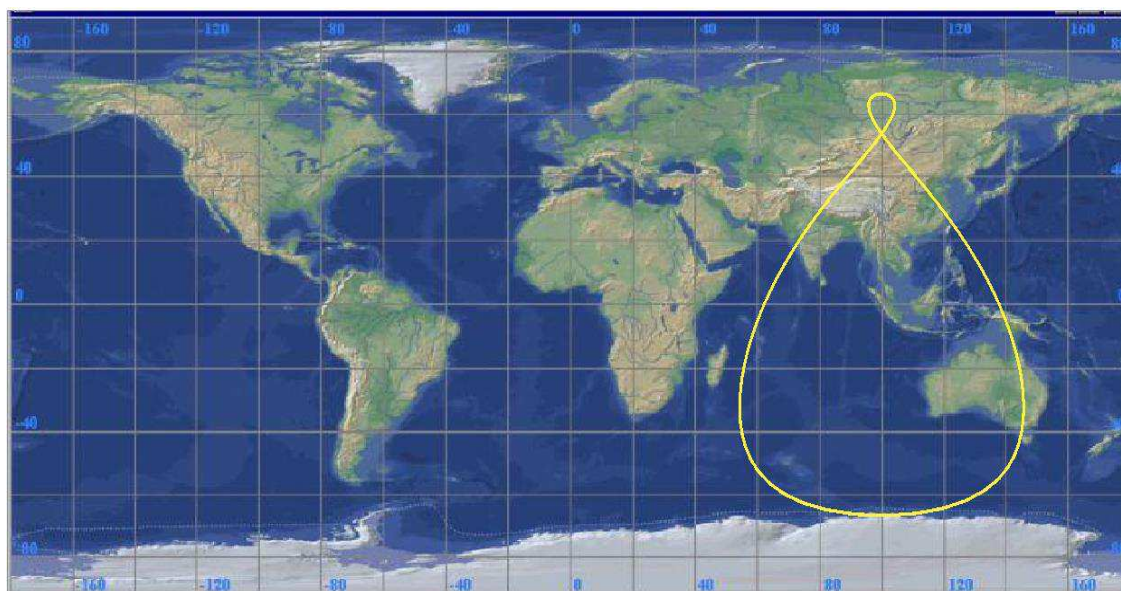


Рисунок 38 - Трасса орбит типа «Тундра» (центр 100°в.д.)

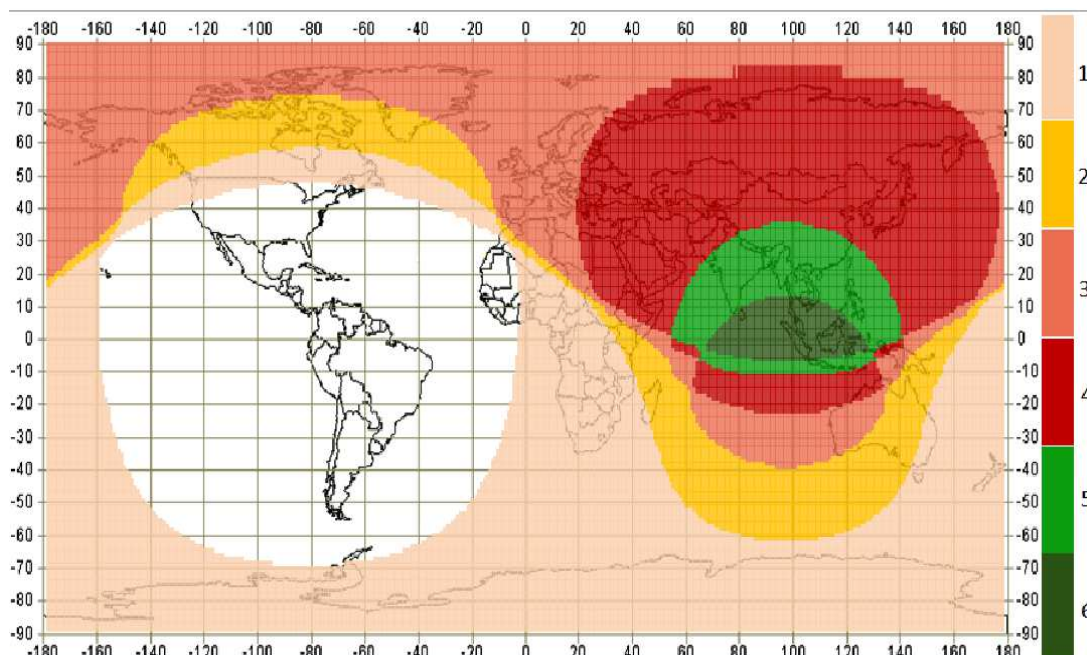


Рисунок 39 - Покрытие Земли минимальным количеством КА, обеспечиваемое ОГ из 6 КА на орбитах типа «Тундра» (центр 100°в.д.) для угла места 5°

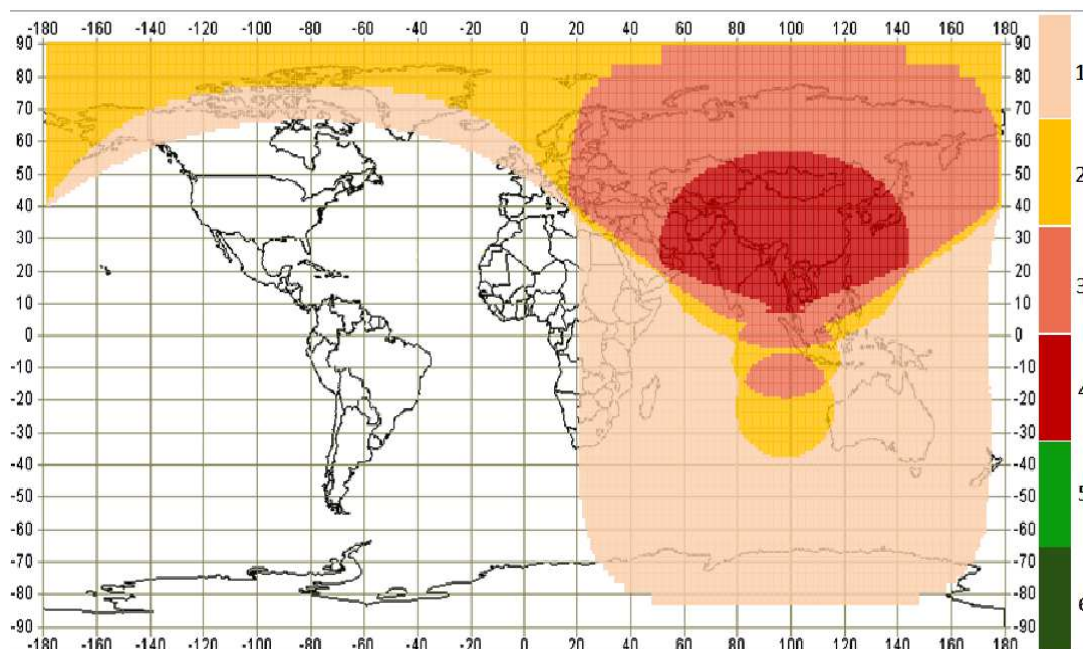


Рисунок 40 - Покрытие Земли минимальным количеством КА, обеспечиваемое ОГ из 6 КА на орбитах типа «Тундра» (центр 100°в.д.) для угла места 25°

Доступность по условию $PDOP \leq 2$, обеспечиваемая ОГ из 6-ти КА типа «Тундра» с одной трассой совместно с орбитальной группировкой ГЛОНАСС, составляет 98,8% на территории России. В городской и горной местности с ограничениями по углу места 25° доступность по условию $PDOP \leq 6$ составит 90,1%.

ОГ из 6-ти КА «Тундра» совместно с ОГ ГЛОНАСС обеспечивает на территории России среднее значение пространственного геометрического фактора $PDOP=1,43$. В условиях ограниченной видимости (угол места 25°) среднее значение $PDOP=3,63$.

Рассмотрим вариант *орбитальной группировки на орбитах типа «Тундра» из 4-х КА*,двигающиеся равномерно вдоль одной трассы с центром 100° по долготе. %. Карта покрытия Земли минимально гарантированным количеством КА приведена на рисунке 41.

Такая ОГ обеспечивает 100% покрытие России двумя КА ВКК.

Прекращение функционирования одного КА ОГ ВКК приводит к снижению плотности гарантированной видимости - рисунок 41. Видимость, обеспечиваемая ОГ из 3-х КА, на территории России составит

- одного КА - 100%;
- двух КА - 92,1%;
- трех КА - 23,5%.

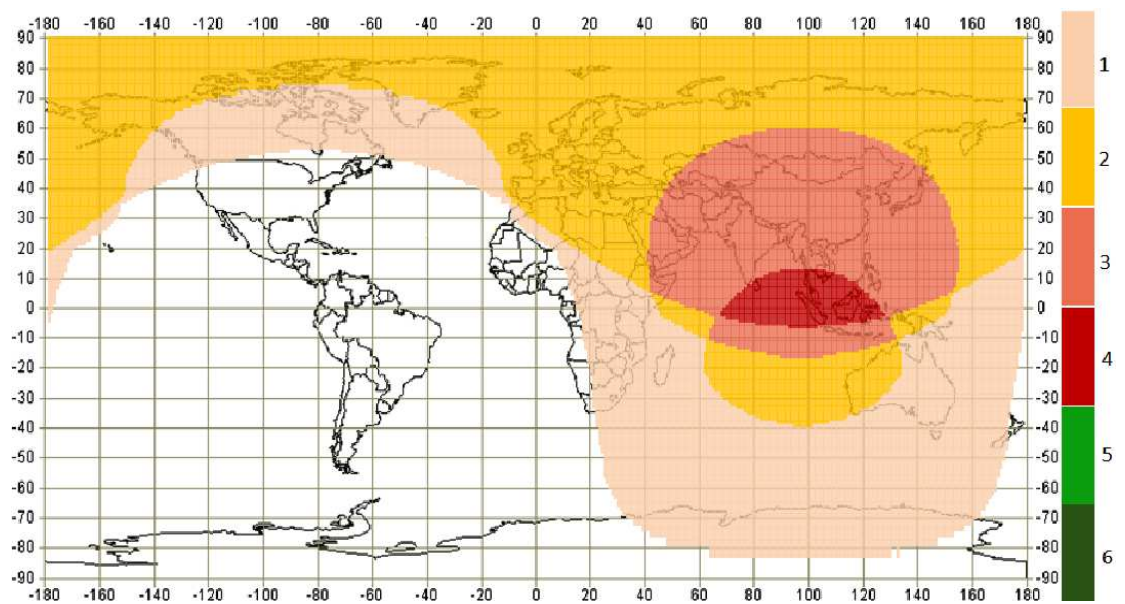


Рисунок 41 - Покрытие Земли минимальным количеством КА, обеспечиваемое ОГ из 4 КА на орбитах типа «Тундра» (центр 100°в.д.) для угла места 5°

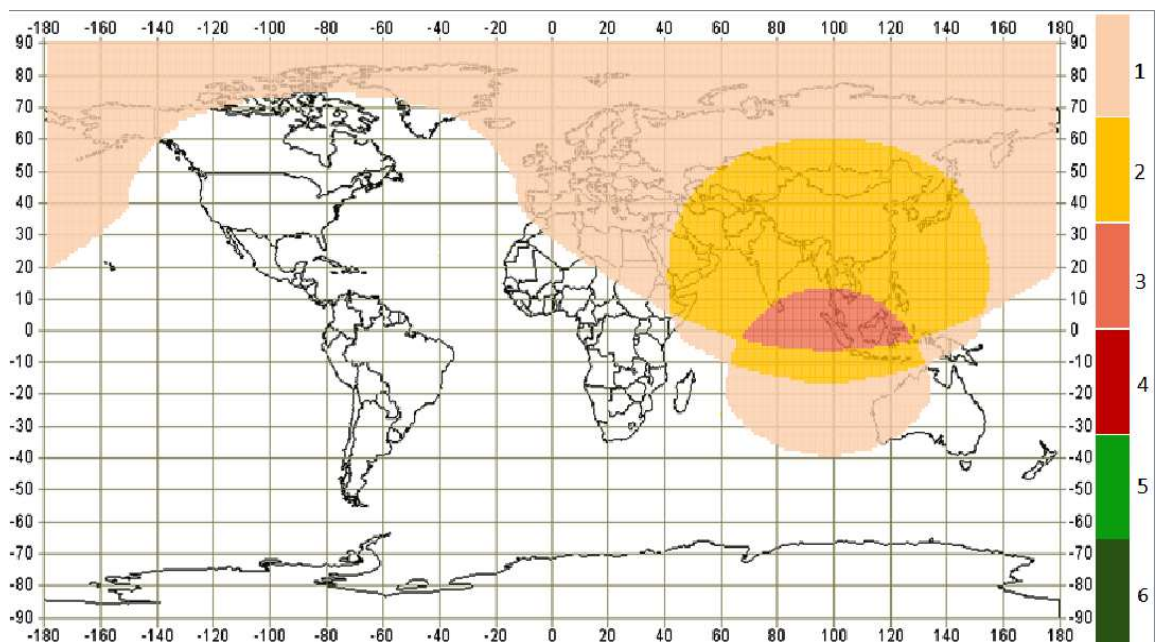


Рисунок 42 - Покрытие Земли минимальным количеством КА, обеспечиваемое ОГ из 3 КА на орбитах типа «Тундра» (центр 100°в.д.) для угла места 5°

В городской и горной местности с ограничениями по углу места 25° ОГ из 4-х КА «Тундра» с одной трассой обеспечит 100% видимость рисунок 42 на территории России двух КА. Но при выпадении одного КА, на территории России гарантированно будет виден один КА - рисунок 43.

Доступность по условию $PDOP \leq 2$, обеспечиваемая ОГ из 4-х КА типа «Тундра» с одной трассой совместно с орбитальной группировкой ГЛОНАСС, составляет 97,1% на территории России. В городской и горной местности с ограничениями по углу места 25° доступность по условию $PDOP \leq 6$ составит 85,5%.

ОГ из 4 КА «Тундра» совместно с ОГ ГЛОНАСС обеспечивает на территории России среднее значение пространственного геометрического фактора $PDOP=1,52$. В условиях ограниченной видимости (угол места 25°) среднее значение $PDOP=4,6$.

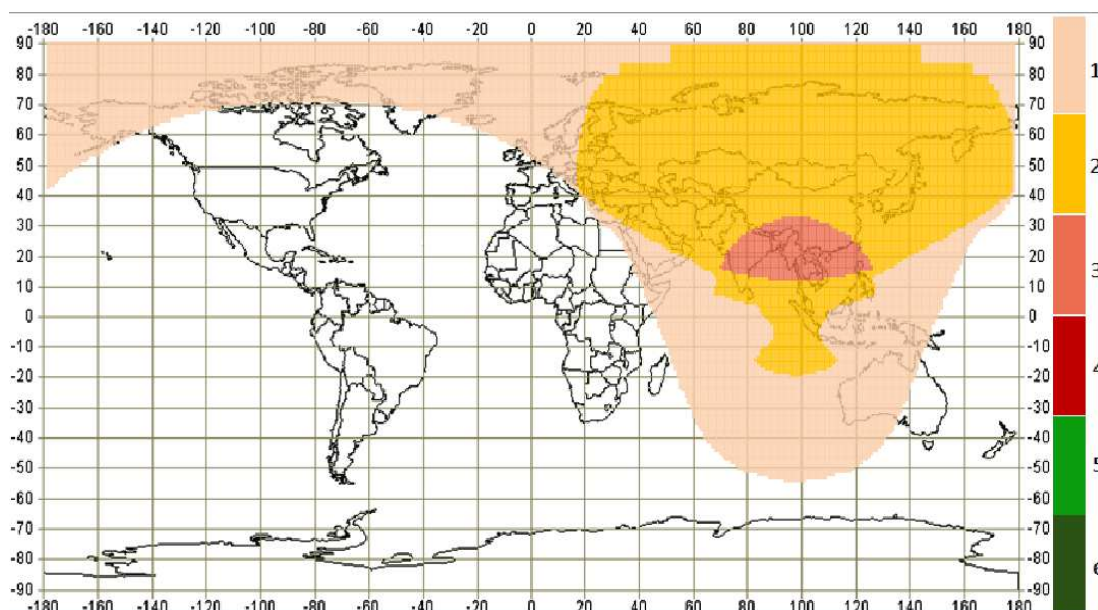


Рисунок 43 - Покрытие Земли минимальным количеством КА, обеспечиваемое ОГ из 4 КА на орбитах типа «Тундра» (центр 100° в.д.) для угла места 25°

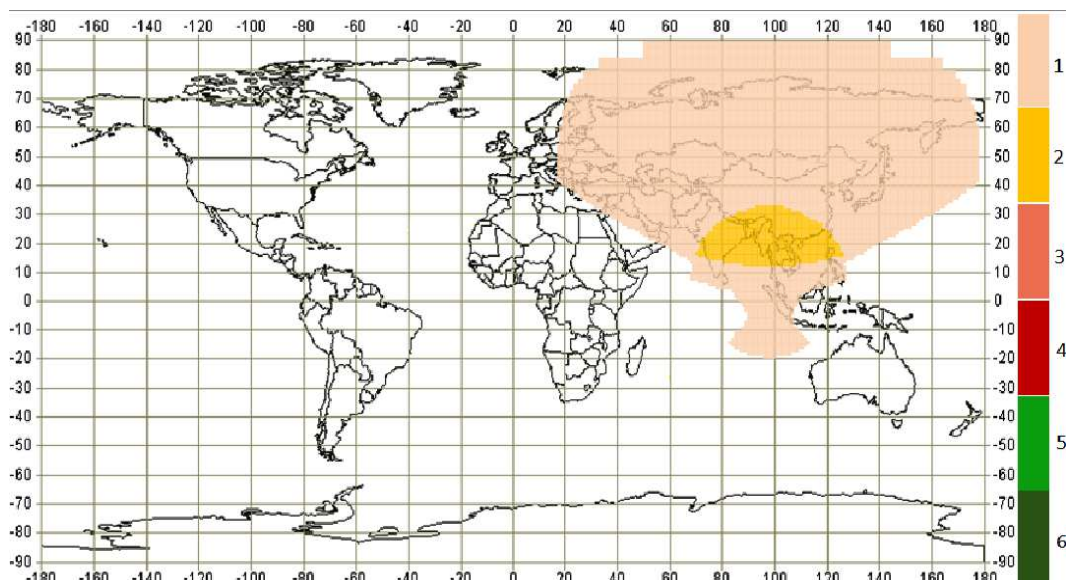


Рисунок 44 - Покрытие Земли минимальным количеством КА, обеспечиваемое ОГ из 3 КА на орбитах типа «Тундра» (центр 100°в.д.) для угла места 25°

В таблицах 17-18 приведена видимость, обеспечиваемая ОГ ВКК из 4 и 6 КА на орбитах типа «Тундра» с одной (центр 100°в.д.) и двумя трассами (центр 70°в.д. и 130°в.д.)

Таблица 17 - Видимость на территории России, обеспечиваемая ОГ ВКК из 4 КА на орбитах типа «Тундра»

Вероятность	для угла места 5°		для угла места 25°	
	4 Тундра (2x2)	4 Тундра (1x4)	4 Тундра (2x2)	4 Тундра (1x4)
Видимость одного КА	100	100	99,2	100
Видимость двух КА	100	100	92,8	100

Таблица 18 - Видимость на территории России, обеспечиваемая ОГ ВКК из 6 КА на орбитах типа «Тундра»

Вероятность	для угла места 5°		для угла места 25°	
	6 Тундра (2x3)	6 Тундра (1x6)	6 Тундра (2x3)	6 Тундра (1x6)
Видимость 1-го КА	100	100	100	99,91
Видимость 2-х КА	100	100	99,2	99,4
Видимость 3-х КА	100	100	88,8	97,6
Видимость 4-х КА	80,3	97,5	45,1	60,9

В таблице 19 приведены навигационные характеристики, обеспечиваемые совместно системой из ОГ ГЛОНАСС и ОГ ВКК на орбитах типа «Тундра». Для сравнения приведены навигационные характеристики штатной ОГ ГЛОНАСС и модернизированных ОГ ГЛОНАСС из 30 КА (ОГ-30А, ОГ-30Б). Расчеты сделаны для территории Российской Федерации и Арктики.

Таблица 19 - Навигационные характеристики, обеспечиваемые системой из ОГ ГЛОНАСС и ОГ ВКК на орбитах типа «Тундра»

Орбитальная группировка	PDOP \leq 2 (угол места 5°)	PDOP \leq 6 (угол места 25°)	Средний PDOP	
			(угол места 5°)	(угол места 25°)
Гло-24	83,9	67,8	1,79	16,17
ОГ-30А	96,1	82,7	1,56	
ОГ-30Б	94,3	84,7	1,60	
Гло-24 + 4Тундра (2x2)	98,6	88,4	1,49	4,57
Гло-24 + 4Тундра (1x4)	97,1	85,5	1,52	4,6
Гло-24 + 6 Тундра (2x3)	99,9	93,8	1,38	3,35
Гло-24 + 6 Тундра (1x6)	98,8	90,1	1,43	3,63

Обобщая варианты ОГ ВКК на орбитах типа «Тундра» можно сделать выводы:

- наибольшее покрытие территории РФ и Арктики обеспечивает ОГ из 6 КА, двигающиеся вдоль одной наземной трассы с центром 100° по долготе;
- на территории РФ и Арктики более высокую доступность и лучший средний пространственный геометрический фактор совместно с ОГ ГЛОНАСС обеспечивает ОГ на орбитах типа «Тундра» с двумя трассами (центр 70° в.д. и 130° в.д.).

Все варианты дополнения ВКК дают существенный результат навигационных функций на территории РФ и Арктики. Разница между рассмотренными вариантами выше не сильна, чтобы сделать выбор в пользу той или иной орбитальной структуры.

Выбор конкретной структуры необходимо производить исходя из многокритериального анализа, в который входит:

- решение дополнительных информационных задач, в частности доставка корректирующей дифференциальной информации;
- оптимизация радиолинии с точки зрения существенной вариабельности радиодальностей и потребной ширины диаграммы направленности антенн для эллиптических орбит и как следствие повышенная мощность целевой радиопередающей аппаратуры;
- вероятность существенного возмущения параметров эллиптических орбит за время активного существования КА, что приводит к необходимости либо существенных затрат топлива на поддержание номинальных параметров орбит, либо увеличение мощности бортовых передающих устройств на наихудший случай искажения параметров орбит.
- проведение дополнительных исследований, как возможной точности высокоточного прогноза эфемерид, так и о влиянии изменения релятивистского хода времени бортовых стандартов частоты на точность прогноза хода шкалы времени КА для эллиптических орбит.

2.6 Рой малоразмерных космических аппаратов для решения задач навигации

В последнее время возрос интерес к разработке космических систем, на основе малоразмерных КА. Основной тенденцией развития таких систем, это разработка нового типа космического объекта, т.е. «роя». Под роем следует понимать совокупность однотипных МКА, совместно решающих общую задачу и воспринимаемых потребителем космических услуг как единое целое.

В настоящее время особо остро становится вопрос об обеспечении надежности и безопасности использование сигналов космических навигационных систем. Это касается всех систем без исключения от ГЛОНАСС до Бейдоу.

Это связано как с фактором времени, так и с фактором информационной инерции.

Фактор времени заключается в том, что концепция космических навигационных систем создана более 40 лет назад на этапе проектирования систем GPS и ГЛОНАСС, где не виделись никакие потенциальные угрозы сигналам данных систем. Уровень мощности шумоподобных навигационных сигналов незначительно превосходил реальный уровень радиозумов. Это обеспечивало приемлемые массово-габаритные характеристики космических аппаратов, и как следствие приемлемую цену создания и поддержания таких систем.

В настоящее время столь небольшой уровень мощности навигационных радиосигналов затрудняет их использование как в помещениях так и в лесистой местности под кронами лиственных деревьев.

Наряду с этим разработаны как бытовые, так и военные постановщики помех для навигационных сигналов ГНСС. Использование таких постановщиков помех может затруднить или полностью исключить возможность навигационных определений потребителей в районе действия постановщика помехи.

Фактор информационной инерции обусловлен в первую очередь широким внедрением использования сигналов глобальных спутниковых навигационных систем в жизнь современного общества:

- огромное количество аппаратуры и систем, использующих сигналы ГНСС;
- система международной стандартизации сигналов навигационных систем, которая не позволяет вносить существенные изменения в дисциплину передачи навигационных сигналов.
- международные соглашения о распределении спектра навигационных сигналов и диапазона допустимого уровня мощности

радиосигналов на поверхности Земли не позволяют существенно повысить уровень мощности радионавигационных сигналов ГЛОНАСС.

Следующей проблемой является обеспечение повышенных характеристик сигналов ГЛОНАСС в ограниченных условиях радиовидимости (затенение постройками, естественным рельефом местности и т.д.). Возможности решения этих проблем путем наращивания и модификации орбитальной группировки изложено в предыдущих разделах данной работы.

Прямой эволюционный путь решения проблем устойчивости навигационных радиосигналов заключается в разработке новых сигналов повышенной мощности и помехозащищенности, соответствующие согласования и в конечном итоге разработке новой модификации космического аппарата ГЛОНАСС, излучающего эти новые сигналы.

Эффект от данных мероприятий может быть получен после полного обновления орбитальной группировки ГЛОНАСС космическими аппаратами нового типа. Время такой замены с учетом срока активного функционирования КА Глонасс может составлять *порядка двух десятилетий*.

Другим путем выхода из создавшегося технологического тупика может быть создание надстройки к системе ГЛОНАСС на основе роевых орбитальных структур, которая будет формировать вторичное навигационное поле на основе новых помехоустойчивых сигналов.

Идея построения роевого дополнения следующая:

– КА роевой орбитальной группировки проводят автономное навигационно-временное определение своего вектора состояния по радиосигналам ГЛОНАСС;

– благодаря лучшим условиям радиовидимости КА Глонасс с высот 1000-2000 км над поверхностью Земли, будет обеспечиваться высокая надежность и точность навигационно-временных определений КА роевой группировки.

– КА роевой орбитальной группировки формируют навигационные сообщения на основе навигационно-временных определений по сигналам Глонасс, т.е. в качестве эфемерид и временных поправок КА роевой ОГ будут передавать сглаженные результаты своих навигационно-временных определений по сигналам ГЛОНАСС.

– КА роевой орбитальной группировки передают навигационный сообщения и дальномерные коды в составе новых навигационных сигналов отличных от сигналов ГЛОНАСС.

Для обеспечения повышенной помехоустойчивости и проникаемости новых радиосигналов возможно:

- переход в другой частотный диапазон;
- использование помехоустойчивого кодирования;
- реализация скважного по времени режима передачи радиосигналов повышенной мощности (имеется в виду, что при той-же энерговооруженности роевого КА, возможно повысить мощность передаваемого сигнала пропорционально коэффициенту скважности. Например, при скважности 1:10 мощность передачи может быть повышена в 10 раз по сравнению с уровнем непрерывно излучаемого радиосигнала. Такой подход позволит существенно повысить мощность передаваемого радиосигнала, что позволяет реализовать устойчивую навигацию в помещениях, лесистой местности, а возможно и городских каньонах (сигнал будет проходить сквозь здания);
- новые комплектации НАП будут проводить навигационные определения как по сигналам роевого дополнения, так и по сигналам ГЛОНАСС.

МКА могут производиться и запускаться на низкие орбиты в больших количествах, создавая эффект «роя». Огромное количество малых космических аппаратов позволит создать плотное глобальное навигационное поле. Избыточное количество, заложенное в специфику таких группировок, осложнит неприятелю попытки уничтожить их. Число

малых спутников, которое противник должен будет вывести из строя, чтобы нанести урон системе, будет на порядок больше, чем в случае со штатной ОГ из 24 КА[16].

Вывод аппаратов малой массы на низкие орбиты осуществляется с помощью более дешевых средств легкого или среднего класса, в том числе российских конверсионных ракет, предназначенных для утилизации путем запуска с полезной нагрузкой. Кроме того, часто малые спутники запускаются не поодиночке, а целой группой в составе блока из нескольких МКА, что удешевляет себестоимость запуска одного аппарата.

Для быстрого воспроизводства группировок потребуются недорогие оперативные пусковые возможности. Целесообразно использовать унифицированные космические платформы (УКП). Проектирование спутника с использованием УКП, обладающей определённой степенью универсальности, в состав которой входит неизменная базовая конструкция и отработанная аппаратура бортовых обеспечивающих систем, ведет к сокращению времени разработки и снижения стоимости изготовления и запуска аппарата.

Еще одним преимуществом малых аппаратов перед большими КА являются сжатые сроки создания. Сокращение производственного цикла связано с узкой специализацией спутника, использованием серийных компонентов, унифицированных платформ, традиционных конструкторских и технологических требований к разработке, созданию, запуску и эксплуатации. Сжатые сроки создания способствуют скорейшему возврату инвестиций [16, 17].

2.6.1 Оценка точности навигационных определений наземных потребителей при использовании сигналов роевого дополнения и ГЛОНАСС

Стоит отметить, что при моделировании роевая система имела **равномерное** распределение КА в плоскости орбиты. Однако при достаточно большом количестве КА в роевой группировке упорядоченное структурирование КА теряет актуальность и реальная хаотичная группировка роевых КА будет иметь схожие характеристики с результатами моделирования.

Для исследования были выбраны следующие широтные пояса:

- $90^{\circ} - 70^{\circ}$, включающий Арктику;
- $70^{\circ} - 50^{\circ}$, включающий Россию;
- $50^{\circ} - 30^{\circ}$;
- $30^{\circ} - 10^{\circ}$, критический пояс по характеристикам ГЛОНАСС;
- $(-10^{\circ}); 10^{\circ}$.

В процессе исследования выполнено моделирование вариантов с различными исходными данными. Варианты роевых систем для моделирования представлены в таблице 20.

Таблица 20 – Варианты роевых структур

№ варианта	Высота орбиты, км	Количество КА в системе	Количество орбитальных плоскостей	Наклонение плоскостей орбит, градусы
Вариант 1	1000	400	20	65
Вариант 2	2000	400	20	65
Вариант 3	1000	400	20	85
Вариант 4	2000	400	20	85
Вариант 5	1000	100	5	65
Вариант 6	2000	100	5	65
Вариант 7	1000	100	5	85
Вариант 8	2000	100	5	85

Окончание таблицы 20

Вариант 9	1000	200	10	65
Вариант 10	2000	200	10	65
Вариант 11	1000	200	10	85
Вариант 12	2000	200	10	85

Полученные результаты отображены в таблицах 25-36 в приложении А.

Для роевой системы были приняты следующие ограничения для PDOP: роевая система (РС) <2, совместное значение системы ГЛОНАСС с роевой системой < 2.

Таблица 21 – Наихудший результат РС (вариант 7)

Регион моделирования	Результат	
	70-90	PDOP РС PDOP ОБЩ.
50-70	PDOP РС PDOP ОБЩ.	2,763 1,250
30-50	PDOP РС PDOP ОБЩ.	3,602 1,474
10-30	PDOP РС PDOP ОБЩ.	4,702 1,624
-10-10	PDOP РС PDOP ОБЩ.	5,527 1,571

Самое наихудший результат значения PDOP получилось в варианте 5, моделирования при наклонении 65°, 100 КА, 5 плоскостей, высота 1000 км. Следует отметить, что возможной причиной такого результата является малое количества КА.

Таблица 22 – Наилучший результат РС (вариант 4)

Регион моделирования	Результат	
	70-90	PDOP РС PDOP ОБЩ.
50-70	PDOP РС PDOP ОБЩ.	0,734 0,659
30-50	PDOP РС PDOP ОБЩ.	0,884 0,777
10-30	PDOP РС PDOP ОБЩ.	0,990 0,863
-10-10	PDOP РС PDOP ОБЩ.	1,017 0,888

Наилучший результат моделирования РС выявлен в варианте 8. Он объясняется большим количеством КА, и высотой 2000 км. Но, стоит отметить этот вариант РС будет сильно затратным.

При моделировании варианта 11,12 также результат положительный.

Таблица 23 – Результат моделирования варианта 11

Регион моделирования	Результат	
	70-90	PDOP PC PDOP ОБЩ.
50-70	PDOP PC PDOP ОБЩ.	1,505 1,037
30-50	PDOP PC PDOP ОБЩ.	2,319 1,240
10-30	PDOP PC PDOP ОБЩ.	3,961 1,401
-10-10	PDOP PC PDOP ОБЩ.	3,946 1,401

Таблица 24 – Результат моделирования варианта 12

Регион моделирования	Результат	
	70-90	PDOP PC PDOP ОБЩ.
50-70	PDOP PC PDOP ОБЩ.	1,558 0,846
30-50	PDOP PC PDOP ОБЩ.	1,278 0,994
10-30	PDOP PC PDOP ОБЩ.	1,670 1,164
-10-10	PDOP PC PDOP ОБЩ.	1,902 1,206

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 КА штатной ОГ из 24 КА;

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

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

- преимущество 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.

Обобщая варианты ОГ ВКК на разных типах орбит можно сделать выводы:

- 1 Наибольшее покрытие территории РФ и Арктики обеспечивает ОГ из 6 КА, двигающиеся одной наземной трассы с центром 100° по долготе, а более высокую доступность и лучший средний пространственный геометрический фактор совместно с ОГ ГЛОНАСС обеспечивает ОГ на орбитах типа «Тундра» с двумя трассами (центр 70° в.д. и 130° в.д.). При этом под воздействием возмущающих сил (сжатие Земли, гравитационное поле Луны и Солнца, атмосфера Земли) параметры орбиты «Тундра» за САС

могут измениться таким образом, что подспутниковая трасса «заваливается на бок» и, соответственно, зона необходимого покрытия смещается с территории России, оголяя восточную часть.

2 Анализ вариантов ОГ ВКК на орбитах M15 показал, что наибольшее покрытие территории РФ и Арктики обеспечивает ОГ из 6 КА, двигающиеся вдоль одной наземной трассы с центром 105° по долготе, но лучшие характеристики совместно с ОГ ГЛОНАСС обеспечивает двухтрассовая ОГ из 6 КА (центр 75° в.д. и 135° в.д.).

3 Орбитальная группировка из 6 КА на орбитах типа QZSS совместно с ОГ ГЛОНАСС обеспечивает сравнимые характеристики, что для однострассовой, что для двухтрассовой структуры. Однако, однострассовая ОГ предпочтительна для условий ограниченной видимости.

4 Орбитальная группировка из 6 КА на геосинхронных круговых орбитах незначительно уступает ОГ ВКК на орбитах типа QZSS и «Тундра» в части навигационных характеристик, но при этом имеют высокую баллистическую устойчивость.

5 Орбитальная группировка из 4 КА ВКК на геосинхронных круговых орбитах и орбитах типа QZSS не обеспечивает гарантированную видимость двух КА над территорией России.

Роевая структура при моделировании показала отличный результат. Выявлены наилучший и наихудший результат. Также определено минимально количество аппаратов, для развития ГНСС ГЛОНАСС на период после 2030 года. Количество аппаратов должно быть не менее 200, при наклонении плоскостей орбит 85° , 10 плоскостей и 20 КА в каждой плоскости.

Предложенная роевая структура в дополнении ГНСС ГЛОНАСС будет является большим прорывом в отечественной навигации.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

ВКК	-	Высокоорбитальный космический комплекс
ГДВУ	-	Географическая долгота восходящего узла
ГМФ	-	Геометрический фактор
ГНСС	-	Глобальная навигационная спутниковая система
ГСНО	-	Геосинхронные наклонные круговые орбиты
КА	-	Космический аппарат
МКА	-	Малый космический аппарат
НАП	-	Навигационная аппаратура потребителя
НКУ	-	Наземный комплекс управления
ОГ	-	Орбитальная группировка
РНП	-	Радионавигационное поле
СВО	-	Средневысотные орбиты
ТТХ	-	Тактико-технические характеристики
УКП	-	Унифицированные космические платформы
PDOP	-	Пространственный геометрический фактор

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 Чеботарев, В. Е. Основы проектирования космических аппаратов информационного обеспечения : учеб. пособие / В.Е.Чеботарев, Е.В. Косенко; Сиб. гос. аэрокосм. ун-т. Красноярск, 2011. 488 с.

2 Харисов, В. Н. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования: учебное пособие / В.Н. Харисов, под ред. В. Н. Харисова [и др.]. - Москва : Радиотехника, 2010. - 800 с.

3 Шибшаевич, П. П. Сетевые спутниковые радионавигационные системы : учеб. пособие / П.П. Шибшаевич, В. С. Шибшаевич, П. П. Дмитриев, Н. В. Иванцев [и др.] ; под ред. В. С. Шибшаевича. 2-е изд., перераб. и доп. Москва: Радио и связь, 1993. 408 с.

4 Косенко, В. Е. Программа поддержания штатной орбитальной группировки системы ГЛОНАСС на период до 2020 года / В.Е. Косенко, В.Д. Звонарь, А.Н. Кульков, В.Е. Чеботарев, Р.Ф. Фаткулин, О.В. Ружилова // Системный анализ, управление и навигация : материалы 18-й Междунар. конф. Евпатория. 2013.

5 Звонарь, В. Д. Моделирование параметрических характеристик навигационного КА на теневых орбитах / В.Д. Звонарь, В. Е. Чеботарев, Р. Ф. Фаткулин, А. К. Гречкосеев, Ю. А. Тентилов, Ю. Б. Волошко // Системный анализ, управление и навигация : материалы 18-й Междунар. конф. Евпатория. 2013.

6 Ступак, Г. Г. Исследование вариантов совершенствования структуры орбитальной группировки ГНСС ГЛОНАСС до 2020 года и далее с учетом доведения ее состава к 2020 году до 30 КА / Г.Г. Ступак, С. Г. Ревнивых, Е. И. Игнатович, В. В. Куршин, В. В. Бетанов, С. С. Панов, Н. З. Бондарев, В. Е. Чеботарев, Н. Н. Балашова, А. И. Сердюков, Л. Н. Синцова // Красноярск - Вестник СибГАУ. 2013. № 6. С. 23–31.

7 Тестоедов, Н. А. История создания и перспективы развития космической навигации в России / Н.А. Тестоедов, В.Е. Косенко, С. В.

Сторожев, В. Д. Звонарь, В. И. Ермоленко, В. Е. Чеботарев // Красноярск - Вестник СибГАУ. 2013. № 6 (52). С.7–17.

8 Тестоедов, Н. А. Концепция программы развития космического комплекса системы ГЛОНАСС // Системный анализ, управление и навигация : материалы 19-й Междунар. конф. Анапа. 2014.

9 ГНСС GALILEO. [Электронный ресурс]: Прикладной потребительский центр и система информационного обеспечения. – Режим доступа: <http://prcmnic.ru/gnss/galileo>.

10 ГНСС BEIDOU. [Электронный ресурс]: Прикладной потребительский центр и система информационного обеспечения.- Режим доступа: <http://prcmnic.ru/gnss/beidou>.

11 Косенко, В. Е. Направления модернизации космического комплекса системы ГЛОНАСС / В.Е. Косенко, С.В. Сторожев, В.Д. Звонарь, Р.Ф. Фаткулин, В.Е. Чеботарев // Системный анализ, управление и навигация : материалы 20-й Междунар. конф. Евпатория. 2015.С. 5-17.

12 Косенко, В. Е. Архитектура высокоорбитального дополнения к системе ГЛОНАСС / В.Е. Косенко, В.Д. Звонарь, Ю.Б. Волошко, В.Е. Чеботарев// Системный анализ, управление и навигация : материалы 22-й Междунар. конф. Евпатория. 2017. С. 9–10.

13 Шилко, И.И. Анализ вариантов модернизации структуры орбитальной группировки системы ГЛОНАСС для обеспечения её конкурентоспособности / И.И. Шилко, Ю.Б. Волошко, О.В. Ружилова, О.А. Анисимова // Космические аппараты и технологии. 2019. № 1 (27). С.5–11.

14 Перов, А.И. Принцип построения и функционирования ГЛОНАСС: учеб. пособие / А.И. Перов, В.Н. Харисова- Москва, 2010. – 796 стр.

15 ГЛОНАСС. Интерфейсный контрольный документ, редакция 5.1. М., 2016, [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://aggf.ru/gnss/glon/ikd51ru.pdf>.

16 Потюпкин, А.Ю. Кластера малоразмерных космических аппаратов как новый тип космических объектов / А.Ю. Потюпкин, Н.С. Данилин, А.С. Селиванов // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. 2017. №4 (4). С.45-56.

17 Петрукович, А.А. Малые спутники для космических исследований / А.А. Петрукович, О.В. Никифоров // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. 2016. № 3 (4). С. 22-31.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Результат моделирования

Таблица 25 – Результат моделирования варианта 1

Моделируемая территория	Наклонение орбиты	Кол-во аппаратов	Кол-во плоскостей, шт	Высота орбиты, км	Результат	
					PDOP ГЛ.	PDOP РС PDOP ОБЩ.
70-90	65	400	20	1000 км	1,817	2,655 1,012
50-70	65	400	20	1000 км	1,787	1,016 0,833
30-50	65	400	20	1000 км	2,038	1,179 0,928
10-30	65	400	20	1000 км	2,130	1,366 1,059
-10-10	65	400	20	1000 км	1,943	1,423 1,080

Таблица 26 – Результат моделирования варианта 2

Моделируемая территория	Наклонение орбиты	Кол-во аппаратов	Кол-во плоскостей, шт	Высота орбиты, км	Результат	
					PDOP ГЛ.	PDOP РС PDOP ОБЩ.
70-90	65	400	20	2000 км	1,817	1,109 0,774
50-70	65	400	20	2000 км	1,787	0,729 0,686
30-50	65	400	20	2000 км	2,038	0,817 0,706
10-30	65	400	20	2000 км	2,130	0,923 0,817
-10-10	65	400	20	2000 км	1,943	0,965 0,841

Таблица 27 – Результат моделирования варианта 3

Моделируемая территория	Наклонение орбиты	Кол-во аппаратов	Кол-во плоскостей, шт	Высота орбиты, км	Результат	
					PDOP ГЛ. PDOP РС PDOP ОБЩ.	
70-90	85	400	20	1000 км	PDOP ГЛ. PDOP РС PDOP ОБЩ.	1,817 0,773 0,692
50-70	85	400	20	1000 км	PDOP ГЛ. PDOP РС PDOP ОБЩ.	1,787 1,062 0,845
30-50	85	400	20	1000 км	PDOP ГЛ. PDOP РС PDOP ОБЩ.	2,038 1,325 0,998
10-30	85	400	20	1000 км	PDOP ГЛ. PDOP РС PDOP ОБЩ.	2,130 1,485 1,108
-10-10	85	400	20	1000 км	PDOP ГЛ. PDOP РС PDOP ОБЩ.	1,943 1,570 1,128

Таблица 28 – Результат моделирования варианта 4

Моделируемая территория	Наклонение орбиты	Кол-во аппаратов	Кол-во плоскостей, шт	Высота орбиты, км	Результат	
					PDOP ГЛ. PDOP РС PDOP ОБЩ.	
70-90	85	400	20	2000 км	PDOP ГЛ. PDOP РС PDOP ОБЩ.	1,817 0,600 0,575
50-70	85	400	20	2000 км	PDOP ГЛ. PDOP РС PDOP ОБЩ.	1,787 0,734 0,659
30-50	85	400	20	2000 км	PDOP ГЛ. PDOP РС PDOP ОБЩ.	2,038 0,884 0,777
10-30	85	400	20	2000 км	PDOP ГЛ. PDOP РС PDOP ОБЩ.	2,130 0,990 0,863
-10-10	85	400	20	2000 км	PDOP ГЛ. PDOP РС PDOP ОБЩ.	1,943 1,017 0,888

Таблица 29 – Результат моделирования варианта 5

Моделируемая территория	Наклонение орбиты	Кол-во аппаратов	Кол-во плоскостей, шт	Высота орбиты, км	Результат	
					PDOP ГЛ. PDOP PC PDOP ОБЩ.	
70-90	65	100	5	1000 км	PDOP ГЛ. PDOP PC PDOP ОБЩ.	1,817 4,121 1,334
50-70	65	100	5	1000 км	PDOP ГЛ. PDOP PC PDOP ОБЩ.	1,787 2,221 1,259
30-50	65	100	5	1000 км	PDOP ГЛ. PDOP PC PDOP ОБЩ.	2,038 3,423 1,422
10-30	65	100	5	1000 км	PDOP ГЛ. PDOP PC PDOP ОБЩ.	2,130 3,529 1,628
-10-10	65	100	5	1000 км	PDOP ГЛ. PDOP PC PDOP ОБЩ.	1,943 4,512 1,555

Таблица 30 – Результат моделирования варианта 6

Моделируемая территория	Наклонение орбиты	Кол-во аппаратов	Кол-во плоскостей, шт	Высота орбиты, км	Результат	
					PDOP ГЛ. PDOP PC PDOP ОБЩ.	
70-90	65	100	5	2000 км	PDOP ГЛ. PDOP PC PDOP ОБЩ.	1,817 2,220 1,113
50-70	65	100	5	2000 км	PDOP ГЛ. PDOP PC PDOP ОБЩ.	1,787 1,506 1,087
30-50	65	100	5	2000 км	PDOP ГЛ. PDOP PC PDOP ОБЩ.	2,038 2,094 1,200
10-30	65	100	5	2000 км	PDOP ГЛ. PDOP PC PDOP ОБЩ.	2,130 2,817 1,346
-10-10	65	100	5	2000 км	PDOP ГЛ. PDOP PC PDOP ОБЩ.	1,943 2,459 1,352

Таблица 31 – Результат моделирования варианта 7

Моделируемая территория	Наклонение орбиты	Кол-во аппаратов	Кол-во плоскостей, шт	Высота орбиты, км	Результат	
					PDOP ГЛ. PDOP PC PDOP ОБЩ.	
70-90	85	100	5	1000 км	PDOP ГЛ. PDOP PC PDOP ОБЩ.	1,817 1,576 1,095
50-70	85	100	5	1000 км	PDOP ГЛ. PDOP PC PDOP ОБЩ.	1,787 2,763 1,250
30-50	85	100	5	1000 км	PDOP ГЛ. PDOP PC PDOP ОБЩ.	2,038 3,602 1,474
10-30	85	100	5	1000 км	PDOP ГЛ. PDOP PC PDOP ОБЩ.	2,130 4,702 1,624
-10-10	85	100	5	1000 км	PDOP ГЛ. PDOP PC PDOP ОБЩ.	1,943 5,527 1,571

Таблица 32 – Результат моделирования варианта 8

Моделируемая территория	Наклонение орбиты	Кол-во аппаратов	Кол-во плоскостей, шт	Высота орбиты, км	Результат	
					PDOP ГЛ. PDOP PC PDOP ОБЩ.	
70-90	85	100	5	2000 км	PDOP ГЛ. PDOP PC PDOP ОБЩ.	1,817 1,163 0,956
50-70	85	100	5	2000 км	PDOP ГЛ. PDOP PC PDOP ОБЩ.	1,787 1,524 1,067
30-50	85	100	5	2000 км	PDOP ГЛ. PDOP PC PDOP ОБЩ.	2,038 1,975 1,238
10-30	85	100	5	2000 км	PDOP ГЛ. PDOP PC PDOP ОБЩ.	2,130 2,573 1,402
-10-10	85	100	5	2000 км	PDOP ГЛ. PDOP PC PDOP ОБЩ.	1,943 2,779 1,401

Таблица 33 – Результат моделирования варианта 9

Моделируемая территория	Наклонение орбиты	Кол-во аппаратов	Кол-во плоскостей, шт	Высота орбиты, км	Результат	
					PDOP ГЛ. PDOP РС PDOP ОБЩ.	
70-90	65	200	10	1000 км	PDOP ГЛ. PDOP РС PDOP ОБЩ.	1,817 3,253 1,165
50-70	65	200	10	1000 км	PDOP ГЛ. PDOP РС PDOP ОБЩ.	1,789 1,457 1,037
30-50	65	200	10	1000 км	PDOP ГЛ. PDOP РС PDOP ОБЩ.	2,035 1,873 1,154
10-30	65	200	10	1000 км	PDOP ГЛ. PDOP РС PDOP ОБЩ.	2,124 2,237 1,314
-10-10	65	200	10	1000 км	PDOP ГЛ. PDOP РС PDOP ОБЩ.	1,943 3,043 1,352

Таблица 34 - Результат моделирования варианта 10

Моделируемая территория	Наклонение орбиты	Кол-во аппаратов	Кол-во плоскостей, шт	Высота орбиты, км	Результат	
					PDOP ГЛ. PDOP РС PDOP ОБЩ.	
70-90	65	200	10	2000 км	PDOP ГЛ. PDOP РС PDOP ОБЩ.	1,812 1,558 0,939
50-70	65	200	10	2000 км	PDOP ГЛ. PDOP РС PDOP ОБЩ.	1,789 1,032 0,939
30-50	65	200	10	2000 км	PDOP ГЛ. PDOP РС PDOP ОБЩ.	2,035 1,157 0,938
10-30	65	200	10	2000 км	PDOP ГЛ. PDOP РС PDOP ОБЩ.	2,124 1,326 1,050
-10-10	65	200	10	2000 км	PDOP ГЛ. PDOP РС PDOP ОБЩ.	1,943 1,543 1,115

Таблица 35 - Результат моделирования варианта 11

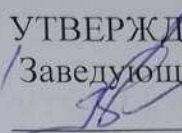
Моделируемая территория	Наклонение орбиты	Кол-во аппаратов	Кол-во плоскостей, шт	Высота орбиты, км	Результат	
					PDOP ГЛ.	PDOP ОБЩ.
70-90	85	200	10	1000 км	PDOP PC	1,812
					PDOP ОБЩ.	1,078
						0,883
50-70	85	200	10	1000 км	PDOP ГЛ.	1,789
					PDOP PC	1,505
					PDOP ОБЩ.	1,037
30-50	85	200	10	1000 км	PDOP ГЛ.	2,035
					PDOP PC	2,319
					PDOP ОБЩ.	1,240
10-30	85	200	10	1000 км	PDOP ГЛ.	2,124
					PDOP PC	3,961
					PDOP ОБЩ.	1,401
-10-10	85	200	10	1000 км	PDOP ГЛ.	1,943
					PDOP PC	3,946
					PDOP ОБЩ.	1,407

Таблица 36 – Результат моделирования варианта 12

Моделируемая территория	Наклонение орбиты	Кол-во аппаратов	Кол-во плоскостей, шт	Высота орбиты, км	Результат	
					PDOP ГЛ.	PDOP ОБЩ.
70-90	85	200	10	2000 км	PDOP PC	1,812
					PDOP ОБЩ.	0,833
						0,744
50-70	85	200	10	2000 км	PDOP ГЛ.	1,789
					PDOP PC	1,558
					PDOP ОБЩ.	0,846
30-50	85	200	10	2000 км	PDOP ГЛ.	2,035
					PDOP PC	1,278
					PDOP ОБЩ.	0,994
10-30	85	200	10	2000 км	PDOP ГЛ.	2,124
					PDOP PC	1,670
					PDOP ОБЩ.	1,164
-10-10	85	200	10	2000 км	PDOP ГЛ.	1,943
					PDOP PC	1,902
					PDOP ОБЩ.	1,206

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение
высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Институт космических и информационных технологий
институт

Межинститутская базовая кафедра
«Прикладная физика и космические технологии»
кафедра

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой

В.Е. Косенко
подпись инициалы, фамилия
«20» 06 2019 г

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Разработка предложений по развитию структуры орбитальной группировки
глобальной навигационной спутниковой системы ГЛОНАСС на период
после 2030 года

тема


27.04.03 Системный анализ и управление

код и наименование направления

27.04.03.06 Основы проектирования космических аппаратов

код и наименование магистерской программы

Научный руководитель


20.06.19
подпись, дата

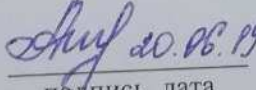
Доцент кафедры
канд.техн.наук

должность, ученая
степень

И.И. Шилко

инициалы, фамилия

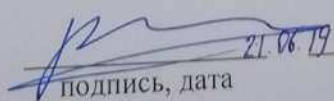
Выпускник


20.06.19
подпись, дата

О.А. Анисимова

инициалы, фамилия

Рецензент


21.06.19
подпись, дата

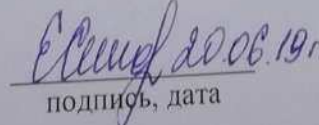
Вед. инженер
«АО ИСС»

должность, ученая
степень

Ю.Б. Волошко

инициалы, фамилия

Нормоконтролер


20.06.19 г.
подпись, дата

Е.С. Сидорова

инициалы, фамилия

Красноярск 2019