

## Сравнительный анализ глобальных дополнений системы ГЛОНАСС

**С. И. Ватутин**, к. т. н., *otd0943\_vsi@mail.ru*

*АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация*

**А. А. Бирюков**, *hg10user@yandex.ru*

*АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация*

**И. К. Курков**, *ab5126@g2.ru*

*АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация*

**Аннотация.** Рассмотрены два возможных направления наращивания системы ГЛОНАСС с целью улучшения точностных характеристик в глобальном масштабе, а именно создание второй орбитальной группировки системы ГЛОНАСС из дополнительных 24-х навигационных космических аппаратов (НКА) в трех промежуточных плоскостях и создание высокоорбитального дополнения системы ГЛОНАСС из 18 НКА с шестью трассами на круговых геосинхронных наклонных орбитах по три НКА на каждой трассе. Показано, что в широком диапазоне углов затенения двойной ГЛОНАСС имеет явные преимущества перед системой ГЛОНАСС с высокоорбитальным дополнением по критерию максимальной доли времени обеспечения гарантированной точности местоопределения, когда пространственный геометрический фактор меньше шести.

На основе имеющихся опытных данных о стоимости запусков КА на высокие орбиты с использованием разгонных блоков показано, что удвоение группировки ГЛОНАСС дешевле, чем создание глобального высокоорбитального дополнения. Двойной ГЛОНАСС имеет втрое меньший разброс по точности местоопределения на разных долготях при одной широте точки наблюдения, чем ГЛОНАСС с высокоорбитальным дополнением.

Предложен способ наращивания группировки НКА ГЛОНАСС путем использования дополнительных дальномерных М-последовательностей, имеющих низкую взаимную корреляцию с используемым в настоящее время дальномерным кодом.

**Ключевые слова:** навигационный космический аппарат, геометрический фактор, орбитальная группировка, местоопределение, угол затенения, М-последовательность

## Comparative Analysis of Global Augmentations to the GLONASS System

**S. I. Vatutin**, *Cand. Sci. (Engineering)*, *otd0943\_vsi@mail.ru*

*Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation*

**A. A. Biryukov**, *hg10user@yandex.ru*

*Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation*

**I. K. Kurkov**, *ab5126@g2.ru*

*Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation*

**Abstract.** This article considers two possible directions of the GLONASS system expansion to improve the accuracy on a global scale, namely, the creation of a second GLONASS orbital constellation comprising 24 additional navigation satellites in three intermediate planes and the creation of a high-orbit augmentation to the GLONASS system comprising 18 navigation satellites with six subsatellite traces on circular geosynchronous inclined orbits with three satellites on each track. It is shown that in a wide range of shading angles the dual GLONASS has a clear advantage over the GLONASS system with a high-orbit augmentation by the maximum time fraction criterion for the provision of the guaranteed positioning precision when the position dilution of precision is less than 6.

Based on the available experimental data on the costs of high-orbit spacecraft launch using upper-stage rockets, it is shown that doubling the GLONASS grouping has lower costs than creating a global high-orbital satellite augmentation. The dual GLONASS has a three times lower dispersion in positioning accuracy at different longitudes with the same latitude of the observation point than the GLONASS with a high-orbital augmentation.

The paper proposes a method for augmentation of the GLONASS orbital constellation by using additional distance-measurement maximum length sequences having a low cross-correlation with the current distance-measurement code.

**Keywords:** navigation spacecraft, geometric factor, orbital constellation, positioning, shading angle, maximum length sequence

Основным направлением повышения точности местоопределения в нормальных условиях и доступности в сложных условиях наблюдения навигационных космических аппаратов (НКА) является наращивание орбитальной группировки (ОГ). В [1] рассмотрены шесть возможных вариантов модификации системы ГЛОНАСС, причем только два из них не затрагивают структуру существующей системы ГЛОНАСС при наращивании ОГ за счет введения по два и по четыре НКА на трех дополнительных плоскостях. Проведенный в [1] анализ результатов моделирования рассмотренных вариантов модификации системы ГЛОНАСС показал, что наилучшие характеристики доступности НКА имеет вариант из тридцати шести спутников, получающийся путем добавления в каждую из существующих плоскостей четырех спутников с изменением фазового сдвига между точками расположения спутников по аргументу широты с  $45$  до  $30^\circ$ . Возникающие при этом изменения структуры ОГ существующей системы вызывают большие сомнения, поскольку система ГЛОНАСС является классической большой системой, на которую давит груз миллионов существующих пользователей. Поэтому попытаемся рассмотреть альтернативные варианты повышения точности системы ГЛОНАСС путем наращивания группировки ее НКА, исходя из того принципа, что наращивание численности НКА в системе не должно затрагивать сложившуюся конфигурацию системы ГЛОНАСС из 24 НКА.

В настоящей работе рассмотрены два возможных направления наращивания системы ГЛОНАСС с целью улучшения точностных характеристик в глобальном масштабе, а именно: создание второй орбитальной группировки системы ГЛОНАСС из дополнительных 24 навигационных космических аппаратов (НКА) в трех промежуточных плоскостях и создание высокоорбитального дополнения системы ГЛОНАСС из 18 НКА с шестью трассами на круговых геосинхронных наклонных орбитах (КГСНО) по три НКА на каждой трассе.

Вспомним, что первоначально каждому из 24 НКА ГЛОНАСС приписывалась своя литерная несущая частота, отстоящая от соседних несущих частот примерно на  $0,5$  МГц, причем на каждой из 24 несущих частот излучалась в качестве дальнего кода одна и та же М-последовательность

длиной 511 двоичных единиц с хорошими автокорреляционными свойствами. Однако с развитием международного сотрудничества количество литерных несущих частот пришлось сократить до двенадцати, при этом противоположные НКА в одной плоскости (антиподы) стали работать на одной и той же частоте. Наличие в системе антиподов на одной частоте на работу наземных потребителей никак не повлияло, однако возникли проблемы интерференции сигналов НКА-антиподов для КА-потребителей с высотами орбит свыше  $209$  км, практически с опорной орбиты и выше вплоть до предельной для потребителя системы ГЛОНАСС высоты в  $2000$  км. Эта проблема была успешно решена за счет хороших автокорреляционных свойств дальномерной М-последовательности. Однако в силу дефицита частотного ресурса остался открытым вопрос: где взять дополнительные несущие частоты для наращивания численности НКА в системе ГЛОНАСС?

Поиски ответа на этот вопрос привели к кардинальному решению: отказаться от многочастотного принципа построения системы ГЛОНАСС с одним дальномерным кодом для всех НКА и перейти к одночастотному принципу построения системы, как в системе GPS, с индивидуальным дальномерным кодом для каждого НКА. При этом весьма распространенным является мнение, что произойдет переход от частотного разделения каналов разных НКА в классической системе ГЛОНАСС к кодовому разделению каналов разных НКА на одной несущей частоте за счет хороших взаимокорреляционных свойств сигналов, как в системе GPS. Однако, строго говоря, в системе ГЛОНАСС нет частотного разделения каналов. Ведь при разнесении несущих частот примерно на  $0,5$  МГц полоса частот сигнала стандартной точности (СТ) составляет порядка  $1$  МГц, а сигнала высокой точности — порядка  $5$  МГц. Понятно, что ни о каком классическом частотном разделении каналов на полосовых фильтрах при структуре сигналов системы ГЛОНАСС не может идти речи. Разделение каналов в системе ГЛОНАСС происходит исключительно за счет корреляционного приема дальномерных сигналов. В сущности, осуществляется прием в целом шумоподобного сигнала длиной в одну миллисекунду. Получается, что ширина

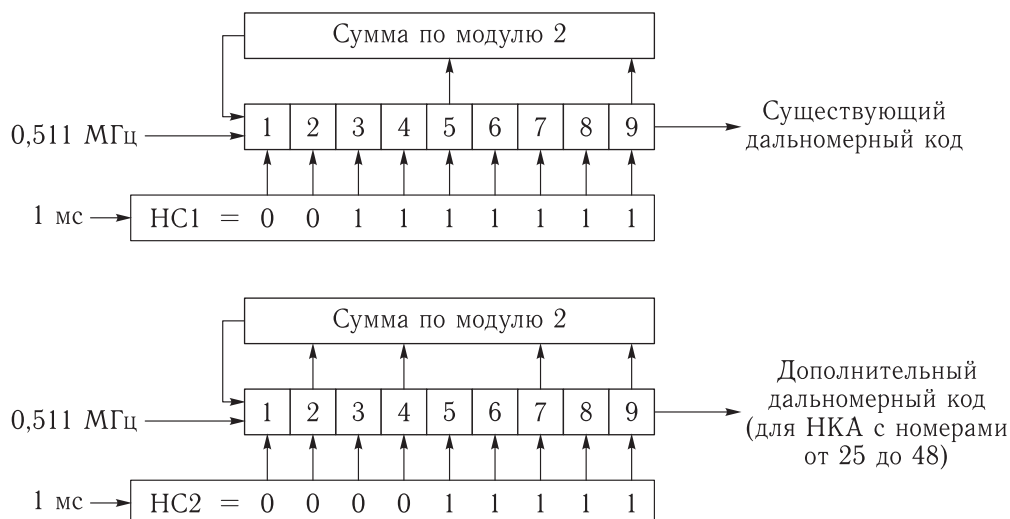


Рис. 1. Схемы формирования существующего и дополнительного дальномерного кодов сигнала стандартной точности ГЛОНАСС

спектра такого сигнала на выходе корреляционно-го приемника составляет всего порядка двух килогерц. Даже при наличии доплеровского сдвига на 10–15 кГц разнесение несущих частот на 0,5 МГц делает сигналы разных НКА совершенно ортогональными, за исключением НКА-антиподов, когда разделение каналов двух НКА обеспечивается хорошими автокорреляционными свойствами дальномерной  $M$ -последовательности системы ГЛОНАСС в условиях противоположного доплеровского сдвига несущих частот. Эти свойства сигналов системы ГЛОНАСС имеют явные преимущества перед совокупностью сигналов системы GPS, в которой уровень межканальных помех возрастает пропорционально количеству одновременно видимых НКА.

Подобные рассуждения неизбежно приводят к вопросу: «А почему бы не найти по крайней мере еще одну  $M$ -последовательность длиной 511 с такими же хорошими автокорреляционными свойствами, как у  $M$ -последовательности существующей многочастотной системы ГЛОНАСС, и с хорошими взаимокорреляционными свойствами этих  $M$ -последовательностей для их кодового разделения?» В результате поиска ответа на этот вопрос  $M$ -последовательность с нужными свойствами была найдена. Схемы формирования существующей и второй  $M$ -последовательности приведены на рис. 1.

Существующий дальномерный код сигнала СТ ГЛОНАСС представляет собой  $M$ -последовательность длины 511 и периода 1 мс, формируемую 9-разрядным регистром с отводной последовательностью {5,9}. Сдвиг в регистре выполняется от ячейки с меньшим номером к ячейке с большим номером. С периодичностью 1 раз в 1 мс в регистр устанавливается начальное состояние HC1 = 00111111.  $M$ -последовательность снимается с последней ячейки регистра.

Дополнительный дальномерный код сигнала СТ ГЛОНАСС предлагается использовать для НКА с номерами от 25 до 48. Он отличается от существующего дальномерного кода тем, что используются другие номера последовательности отводов {2,4,7,9} и другое начальное состояние HC2 = 00001111 (оно выбирается произвольно).

Корреляционные свойства этих двух дальномерных кодов следующие:

- средний квадрат пика периодической взаимной корреляционной функции (ВКФ) равен  $-27,08$  дБ (вычислено при одном отсчете на символ дальномерного кода);
- максимальный квадрат пика периодической ВКФ равен  $-23,8$  дБ;
- максимальный квадрат бокового пика периодической автокорреляционной функции (АКФ) равен  $-54,17$  дБ.

Полученные взаимно корреляционные свойства совпадают с известными свойствами кодов Голда длины 511, а автокорреляционные свойства совпадают с известными свойствами  $M$ -последовательностей.

Аналогичные взаимно корреляционные свойства могут быть получены с использованием любой из последовательностей отводов, приведенных в табл. 1. Это позволяет для КА-антиподов в дополнении системы ГЛОНАСС выбрать различные возможные  $M$ -последовательности, что гарантирует надежное разделение сигналов КА-антиподов на одной несущей частоте.

Таблица 1. Возможная последовательность отводов для дополнительного дальномерного кода сигнала СТ ГЛОНАСС

Вариант	Количество отводов	Последовательность отводов
1	4	1, 4, 5, 9
2	4	3, 5, 6, 9
3	4	1, 2, 7, 9
4	4	2, 4, 7, 9
5	4	5, 6, 8, 9
6	6	1, 2, 4, 5, 7, 9
7	6	1, 3, 5, 6, 8, 9
8	6	2, 3, 5, 6, 8, 9
9	6	3, 4, 5, 7, 8, 9
10	6	1, 2, 6, 7, 8, 9
11	6	2, 3, 6, 7, 8, 9
12	6	2, 4, 6, 7, 8, 9

Для НКА с номерами от 25 до 48 предлагается провести следующую модернизацию навигационного сообщения ГЛОНАСС:

- количество кадров в суперкадре увеличить от 5 до 10, чтобы передавать в дополнительных кадрах данные дополнительного альманаха;

- в каждом кадре выделить 4 разряда (в 1-й и 3-й строке), чтобы передавать номер кадра;

- признаки модификации НКА (слова  $M_n^A$  и  $M$ ) исключить, поскольку эти признаки в будущем предположительно станут константами и не будут нести смысловой нагрузки;

- разрядность номера НКА в оперативной информации и в альманахе (слова  $n$  и  $n^A$ ) увеличить с 5 до 6 бит (за счет исключения слов  $M_n^A$  и  $M$ ).

Теперь перейдем к сравнительной оценке точностных характеристик существующей системы ГЛОНАСС и ее модификаций с возможными глобальными дополнениями, которые определяются геометрическим фактором соответствующей системы. Для оценки геометрического фактора необходимо знать координаты потребителя и видимых потребителем НКА, причем в топоцентрической системе координат. Поскольку для оценки геометрического фактора не требуется высокой точности расчетов, то для определения координат НКА будем использовать модели движения КА в центральном поле Земли, а при переходе к топоцентрическим координатам учтем сжатие Земли с полюсов в соответствии с моделью гравитационного поля Земли (2,0). Оценки получим с использованием имитационной модели, подробно описанной в работе [2].

Систему ГЛОНАСС с дополнением на базе второй  $M$ -последовательности из 24 аналогичных НКА по 8 на каждой из трех дополнительных плоскостей будем называть ГЛОНАСС-2М, а с дополнением на круговых геосинхронных наклонных орбитах (КГСНО) из 18 НКА по три на каждой из шести трасс соответственно ГЛОНАСС-КГСНО. Промоделировано два варианта орбитального построения КГСНО: по шесть НКА в трех плоскостях и по два НКА в девяти плоскостях с близкими результатами.

НКА исходной системы ГЛОНАСС равномерно размещены в трех плоскостях по 8 КА в каждой. Аргументы широты соседних НКА системы ГЛОНАСС в одной плоскости отличаются на  $45^\circ$ . НКА разных плоскостей системы ГЛОНАСС проходят перигей равномерно во времени. Аргументы широты последовательно проходящих перигей КА ГЛОНАСС разных плоскостей отличаются на  $15^\circ$ . Промежуток времени между прохождениями перигей КА в группировке ГЛОНАСС составляет  $\Delta T_{ГЛп} = T_{ГЛ}/24 = 40\,544/24 = 1689,3$  с, где  $T_{ГЛ} = 40\,544$  с — период обращения КА ГЛОНАСС.

В системе ГЛОНАСС-2М дополнительные три плоскости по восходящему узлу поставлены посередине между плоскостями исходной системы ГЛОНАСС, а аргументы широты в плоскостях

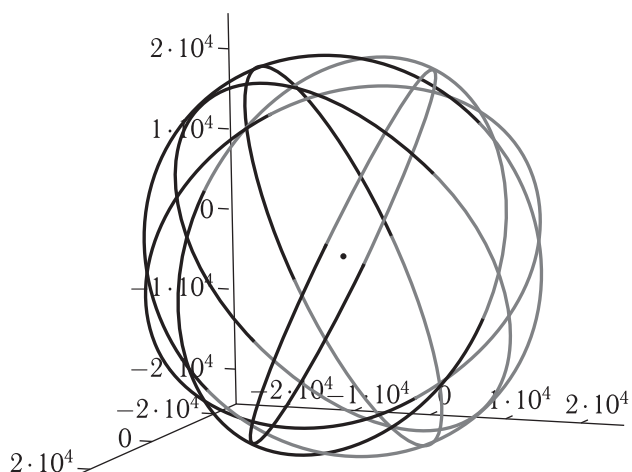


Рис. 2. Орбитальное построение системы ГЛОНАСС с дополнением 2М

сдвинуты на  $7,5^\circ$ . Орбитальная структура системы ГЛОНАСС-2М приведена на рис. 2.

Трассы подспутниковых точек высокоорбитального дополнения КГСНО приведены на рис. 3. Расчеты показывают идентичность показателей качества местоопределения с использованием этих двух реализаций высокоорбитального дополнения системы ГЛОНАСС.

Временные графики количества видимых НКА и пространственного геометрического фактора (ПГФ) для систем ГЛОНАСС, ГЛОНАСС-2М и ГЛОНАСС-КГСНО на умеренно пересеченной местности при маскирующих углах места  $10^\circ$  в Норильске приведены на рис. 4 и 5 соответственно. Уже из этих рисунков видно, что дополнения системы ГЛОНАСС существенно повышают качество работы глобальной навигационной системы.

В работе [2] в качестве критерия сравнения «чистой» системы ГЛОНАСС с системой ГЛОНАСС с региональным для России высокоэллиптическим дополнением использован критерий видимости не менее 4 НКА, поскольку в навигационной литературе распространено мнение, что для местоопределения по спутниковой навигации необходимо видеть как минимум четыре НКА. Однако видимость четырех НКА не гарантирует хорошую точность местоопределения. Достаточно взглянуть на временные графики количества видимых НКА на рис. 6 и ПГФ на рис. 7 для системы ГЛОНАСС на сильно пересеченной местности (или

в сельской застройке) при маскирующих углах места  $25^\circ$  в Уссурийске, когда имеются промежутки времени с четырьмя видимыми НКА. На этих промежутках геометрический фактор резко возрастает с единиц до 80–90, а в середине промежутков времени с четырьмя видимыми НКА имеются пики ПГФ, достигающие десятков и даже сотен тысяч с соответствующим снижением точности местоопределения. Для хорошей точности местоопределения необходимо видеть как минимум пять НКА. Поэтому в дальнейшем будем применять более жесткий критерий гарантированной точности местоопределения, использованный в работе [1], когда  $\text{ПГФ} \leq 6$ , и сравним системы по использованному в работе [1] показателю доступности, то есть доле времени, когда  $\text{ПГФ} \leq 6$ , которую будем обозначать как  $dT(\text{ПГФ} \leq 6)$ .

График зависимости доступности  $dT(\text{ПГФ} \leq 6)$  от маскирующего угла места или, что то же, от угла возвышения зоны радиовидимости (ЗРВ), для Уссурийска представлен на рис. 8. Уссурийск выбран для примера потому, что его широта ( $44^\circ$  с. ш.) близка к широте  $45^\circ$ , где, как показано в работе [1], доступность НКА системы ГЛОНАСС наихудшая. График доступности от маскирующего угла места для каждой системы имеет характерное значение угла начала спада, когда доступность  $dT(\text{ПГФ} \leq 6)$  становится меньше единицы, и значение угла обнуления, когда доступность обращается в ноль. По этим характерным значениям маскирующих углов места исследуемые спутниковые навигационные системы можно сравнить в широкой географии мест размещения наблюдателя.

Любопытно, что доступность  $dT(\text{ПГФ} \leq 6)$  не обладает симметрией относительно экваториальной плоскости, но обладает симметрией относительно центра Земли.

Характеристики доступности систем существенно меняются от широты места наблюдения. Из представленных на рис. 9 графиков доступности систем ГЛОНАСС, ГЛОНАСС-2М и ГЛОНАСС-КГСНО в Норильске видим, что в северных широтах доступность указанных навигационных систем гораздо выше, чем в средних широтах.

На рис. 10 приведены графики зависимости максимального угла затенения систем ГЛОНАСС, ГЛОНАСС-2М и ГЛОНАСС-КГСНО для  $\text{ПГФ} \leq 6$

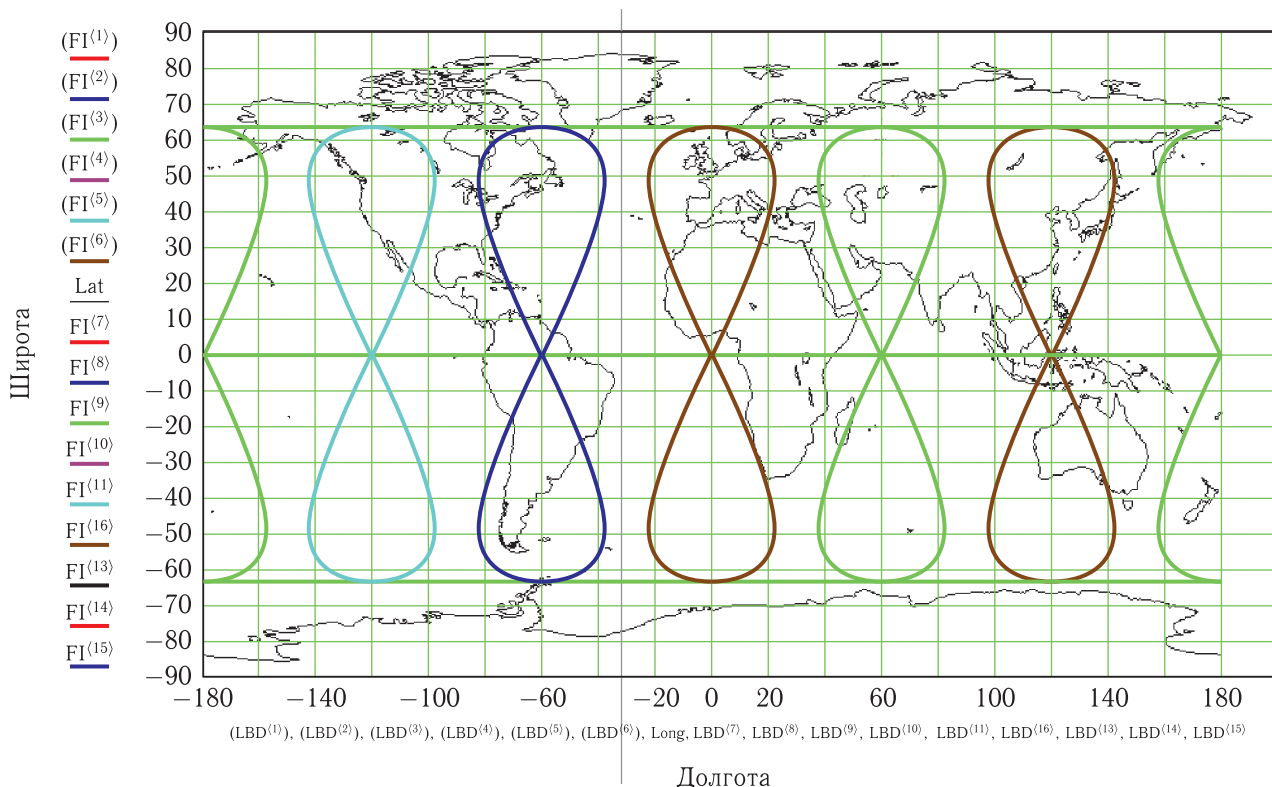


Рис. 3. Трассы подспутниковых точек высокоорбитального дополнения КГСНО

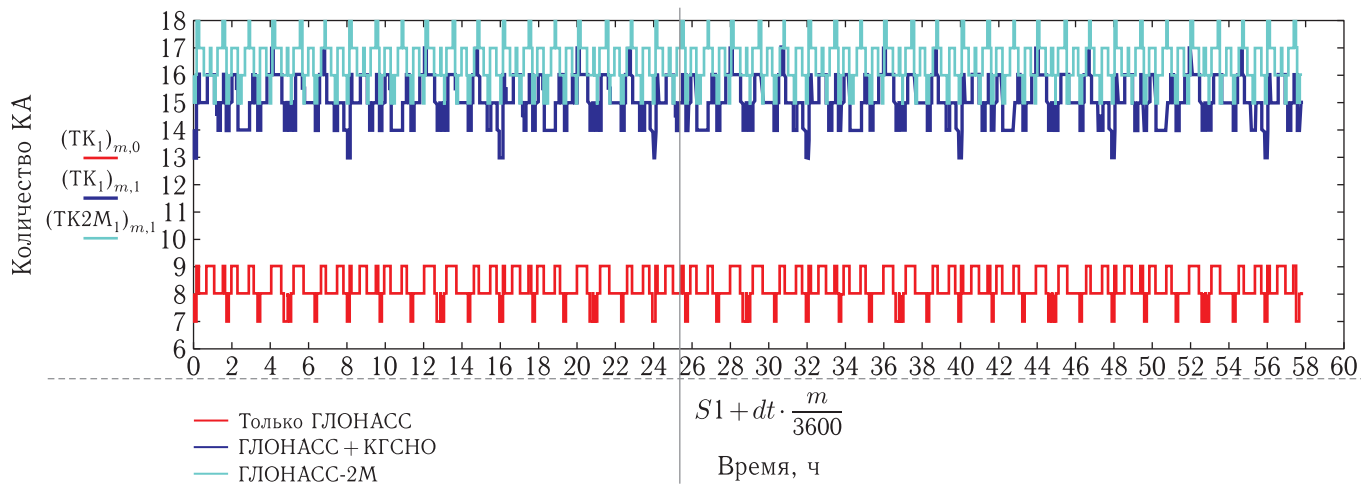


Рис. 4. Количество видимых НКА при маскирующих углах места  $10^\circ$  в Норильске

на 100% времени на широте Уссурийска ( $44^\circ$  с. ш.) в зависимости от долготы. Видим, что график показателя качества местоопределения для системы ГЛОНАСС имеет 17 провалов, которые в точности соответствуют семнадцати горбам на графике

для системы двойной ГЛОНАСС-2М. Это свойство систем ГЛОНАСС и ГЛОНАСС-2М объясняется, по-видимому, тем, что, в соответствии с ИКД [3, с. 50], интервал повторяемости трасс движения НКА и зон радиовидимости НКА наземными сред-

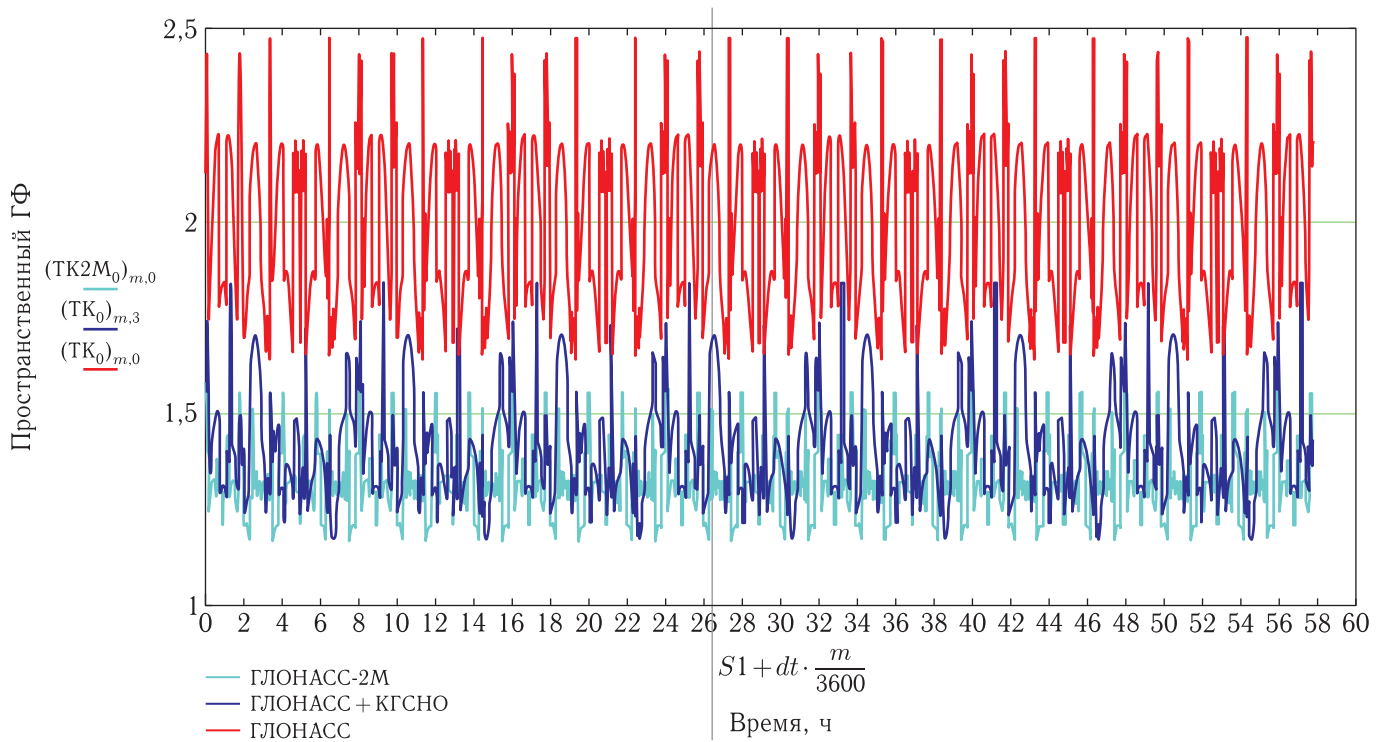


Рис. 5. Пространственный геометрический фактор при маскирующих углах места  $10^\circ$  в Норильске

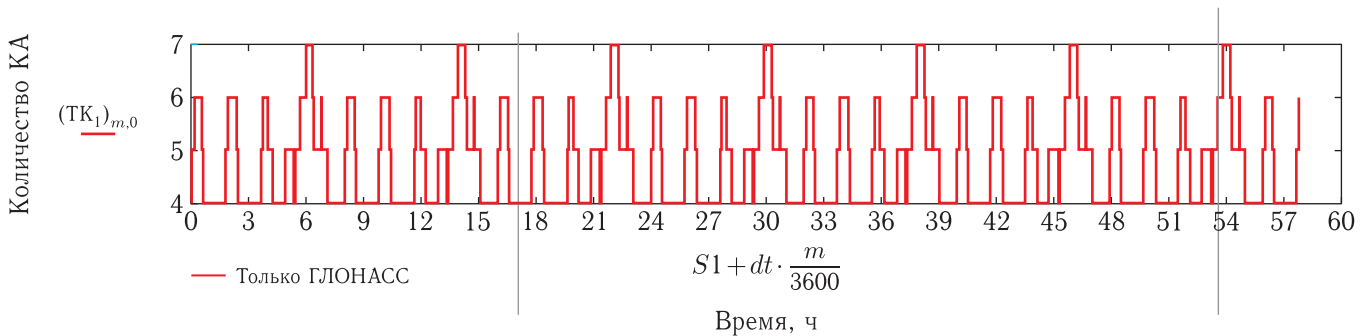


Рис. 6. Количество видимых НКА при маскирующих углах места  $25^\circ$  в Уссурийске

ствами составляет 17 витков (7 сут 23 ч 27 мин 28 с), а горбы и впадины на графиках показателей качества жестко привязаны к трассам прохождения НКА в силу синхронности их взаимного движения, причем все 17 восходящих и 17 нисходящих трасс идентичны (см. рис. 11).

Поскольку средняя скорость прецессии орбитальных плоскостей составляет  $-0,59251 \times 10^{-3}$  рад/сут [3, с. 49], то для конкретной точки на земной поверхности максимальное и минимальное качество местоопределения в районе широты  $45^\circ$  будет повторяться через  $2\pi/0,59251 \times 10^{-3}/365/17 \approx 1,7$  года.

Отметим, что семнадцать горбам графиков показателей качества местоопределения в системе ГЛОНАСС-2М соответствуют 17 пересечений восходящих и нисходящих трасс НКА системы ГЛОНАСС в районе  $45^\circ$ .

К экватору нисходящие и восходящие трассы системы ГЛОНАСС расходятся и на экваторе горбов и впадин на графике показателя качества местоопределения для системы ГЛОНАСС-2М будет уже 34. Как показано на рис. 12, в промежутке долгот от  $120^\circ$  до  $140^\circ$  в.д. на широте  $44^\circ$  Уссурийска имеет место один горб, а на экваторе — два горба, но меньшего размаха.

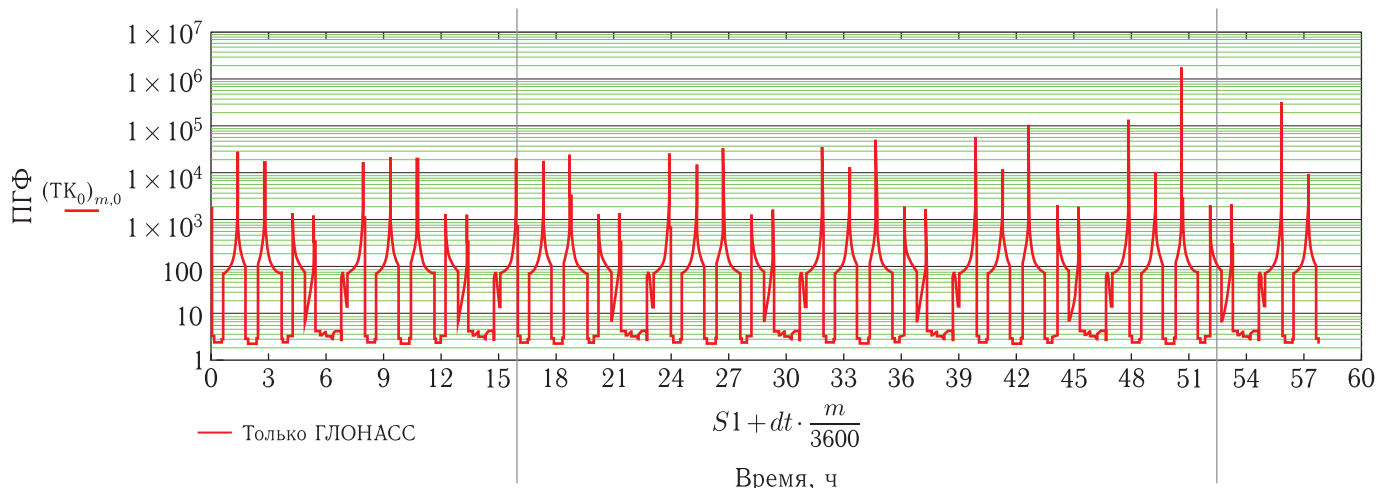


Рис. 7. Пространственный геометрический фактор при маскирующих углах места 25° в Уссурийске

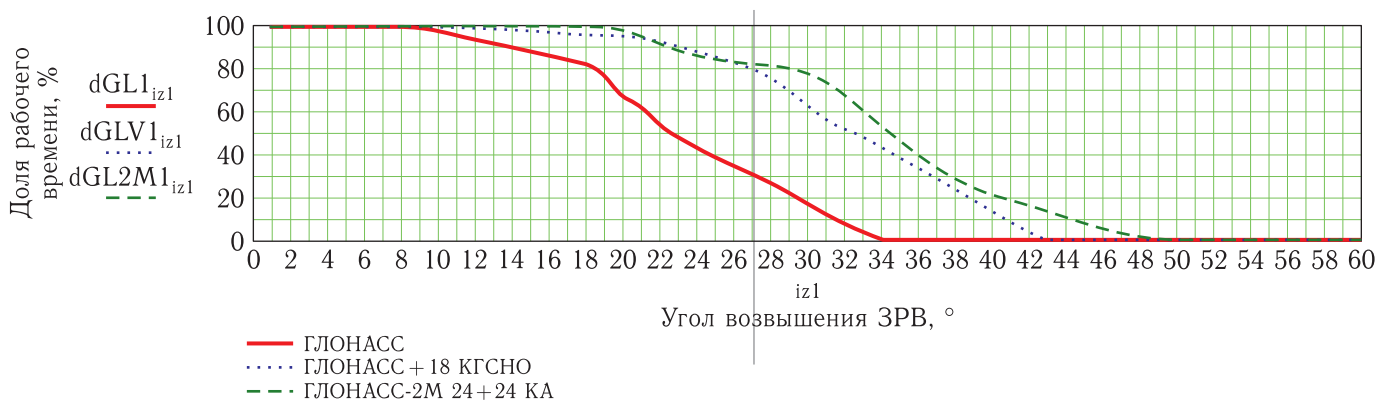


Рис. 8. Графики зависимости доступности систем ГЛОНАСС, ГЛОНАСС-2М и ГЛОНАСС-КГСНО от маскирующего угла места для Уссурийска (44° с. ш., 131° в. д.). Доля рабочего времени, когда ПГФ < 6. Статистика за 266 ч

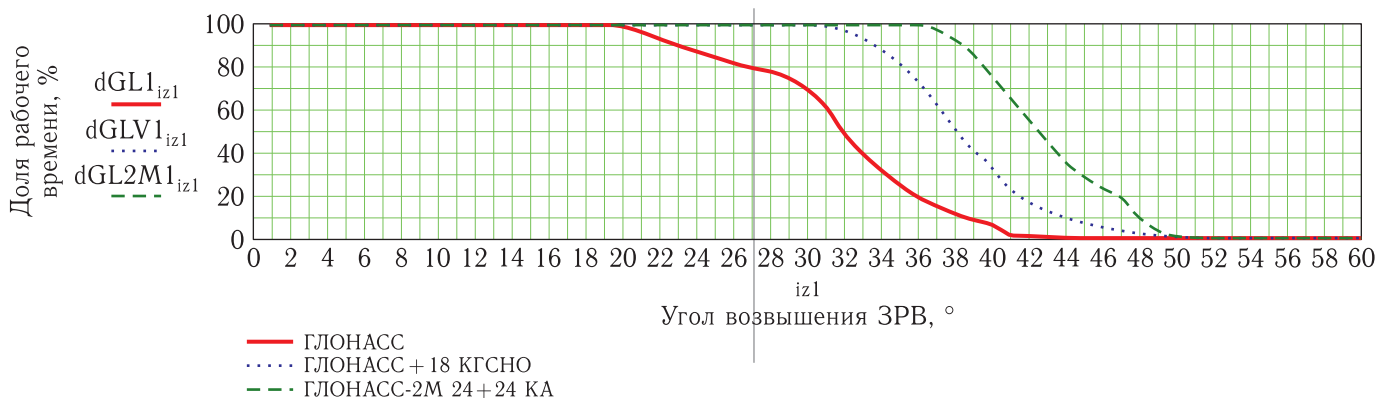


Рис. 9. Графики зависимости доступности систем ГЛОНАСС, ГЛОНАСС-2М и ГЛОНАСС-КГСНО от маскирующего угла места для Норильска (69° с. ш., 87° в. д.). Доля рабочего времени, когда ПГФ < 6



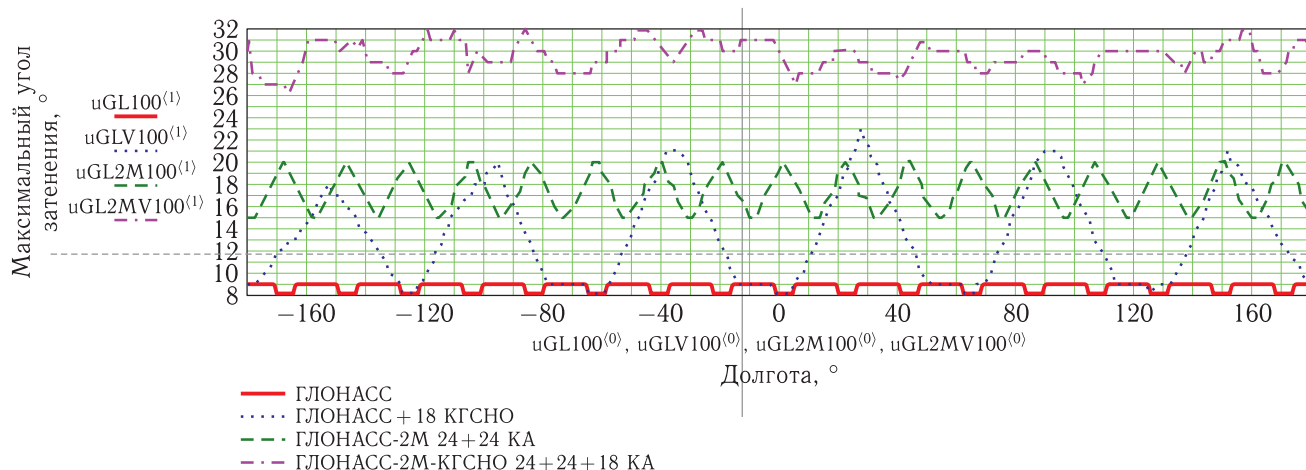


Рис. 10. Графики зависимости максимального угла затенения систем ГЛОНАСС, ГЛОНАСС-2М и ГЛОНАСС-КГСНО для ПГФ ≤ 6 на 100 % времени на широте Уссурийска (44° с. ш.) в зависимости от долготы

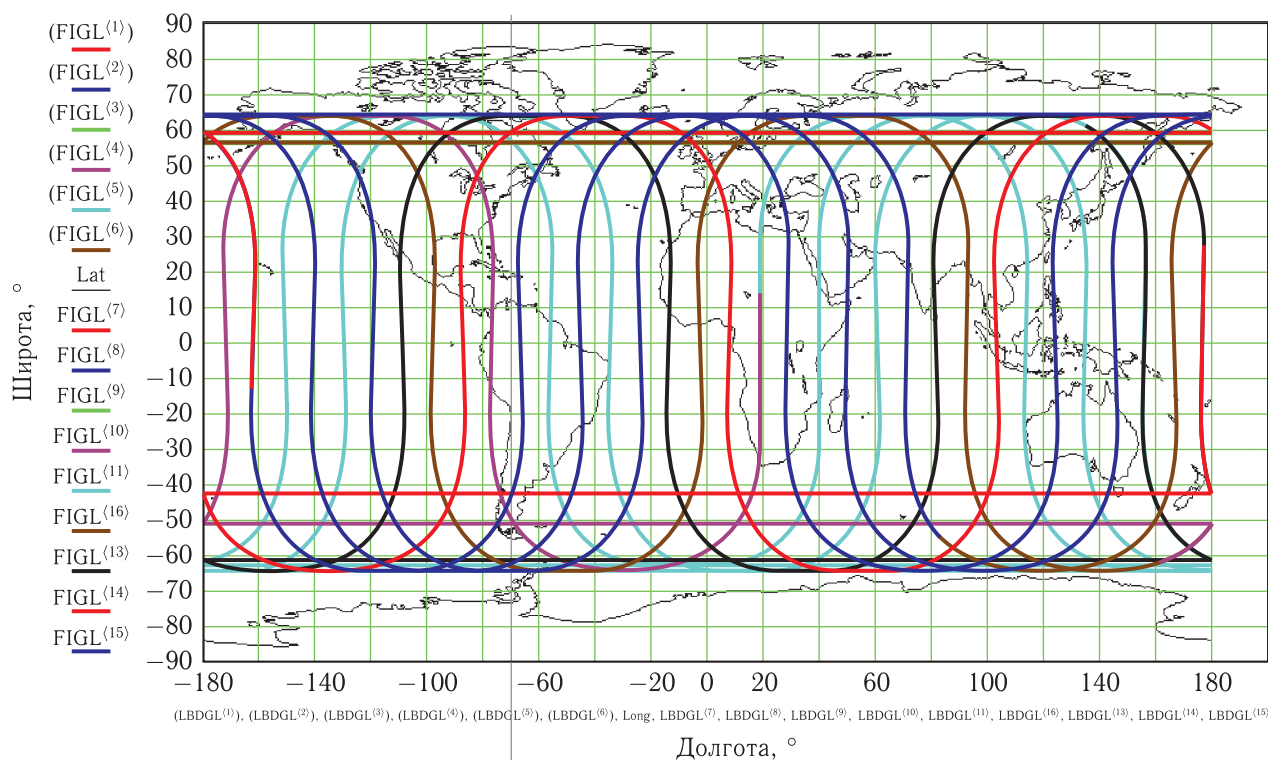


Рис. 11. Трассы подспутниковых точек системы ГЛОНАСС

На графике показателя качества местоопределения для системы ГЛОНАСС-КГСНО с высокоорбитальным дополнением на круговой геосинхронной орбите наблюдаются шесть горбов и шесть впадин (см. рис. 10), соответствующих расположению шести трассам подспутниковых точек высокоорбитального сегмента системы, показанным на рис. 3.

Показатель качества местоопределения для системы ГЛОНАСС + КГСНО изменяется в широких пределах от системы простой ГЛОНАСС до системы двойной ГЛОНАСС-2М.

Таким образом, высокоорбитальное дополнение годится только для создания высококачественных региональных навигационных систем и непригодно

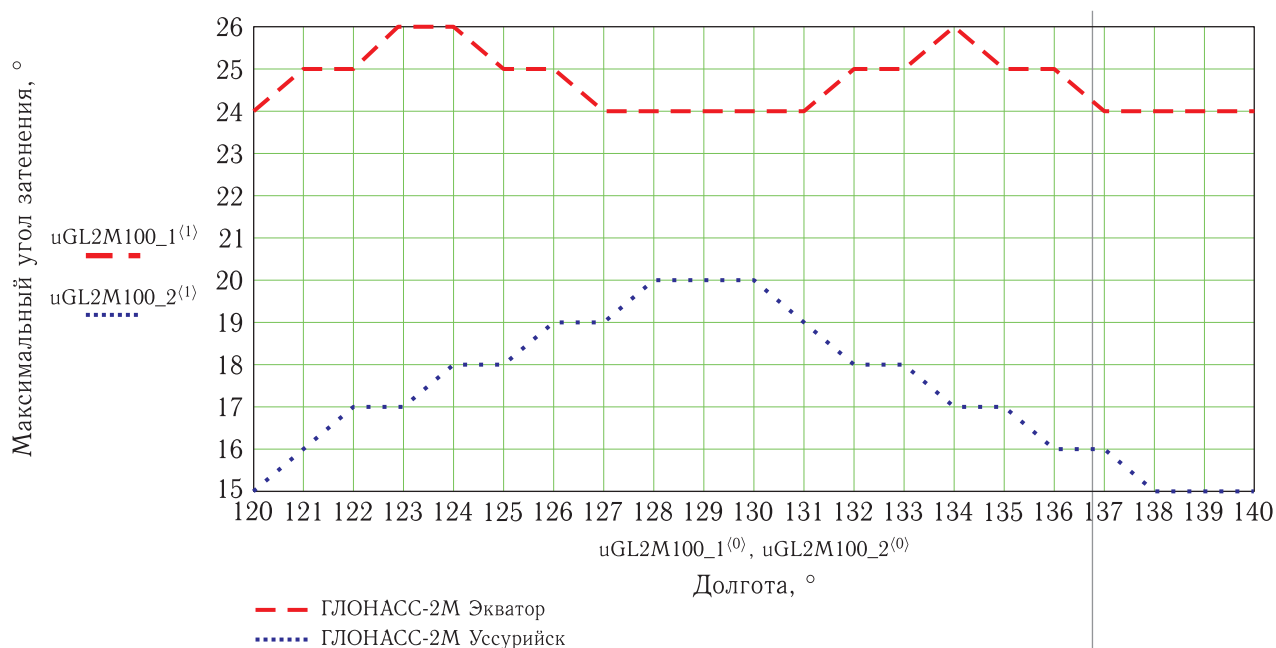


Рис. 12. Графики зависимости максимального угла затенения системы ГЛОНАСС-2М для ПГФ  $\leq 6$  на 100% времени на широте Уссурийска ( $44^\circ$  с. ш.) и на экваторе в зависимости от долготы

для глобальной навигационной системы. Что хорошо для маленькой Японии, совершенно непригодно для громадной России и мира в целом.

Величина размаха между минимумом и максимумом показателя качества местоопределения рассматриваемых систем на разных долготах в зависимости от широты иллюстрируется рис. 13. Видим, что система ГЛОНАСС-2М существенно улучшает качество местоопределения по сравнению с существующей системой ГЛОНАСС, но даже все 66 НКА исходной системы ГЛОНАСС и обеих ее дополнений в совокупности не дают хорошего качества местоопределения в горной местности и в городских условиях на 100% времени при углах затенения порядка  $40^\circ$ . В этом плане интересно будет рассмотреть характеристики системы тройной ГЛОНАСС из 72 НКА.

На графиках систем ГЛОНАСС и ГЛОНАСС-2М на рис. 13 в области широт  $45^\circ$  наблюдается характерный спад характеристик качества местоопределения, отмеченный еще в работе [1].

Объяснить его можно пересечением на этих широтах восходящих и нисходящих трасс НКА ГЛОНАСС, причем расстояние между соответствующими НКА пересекающихся трасс становится ми-

нимальным (порядка 30–35 км). Для наземного наблюдателя НКА этих трасс практически сливаются в точку, что эквивалентно уменьшению числа видимых НКА на единицу, чем и объясняется ухудшение геометрического фактора и, как следствие, снижение характеристик качества местоопределения.

В заключение оценим стоимость развертывания второй группировки КА типа «ГЛОНАСС-М» и создания высокоорбитального дополнения (ВОД) к системе ГЛОНАСС на основании данных по ценам за 2012 г., приведенных в работе [4]. При оценках для простоты принято, что стоимость НКА для высокоорбитального дополнения та же, что и НКА «ГЛОНАСС-М», хотя она должна быть больше уже в силу того, что энергетический потенциал радиолинии для геосинхронной орбиты примерно вчетверо выше, чем для орбиты НКА ГЛОНАСС-М.

В табл. 2 приведены данные о стоимости единичного запуска РН «Протон-М» с РБ «Бриз-М» для государственного заказчика. В табл. 3 приведены данные о стоимости развертывания второй группировки с КА типа «ГЛОНАСС-М» при использовании РН «Протон-М» с РБ «Бриз-М».

Принимаем, что цена КА для ВОД в серийном исполнении будет равна цене КА «ГЛОНАСС-М».

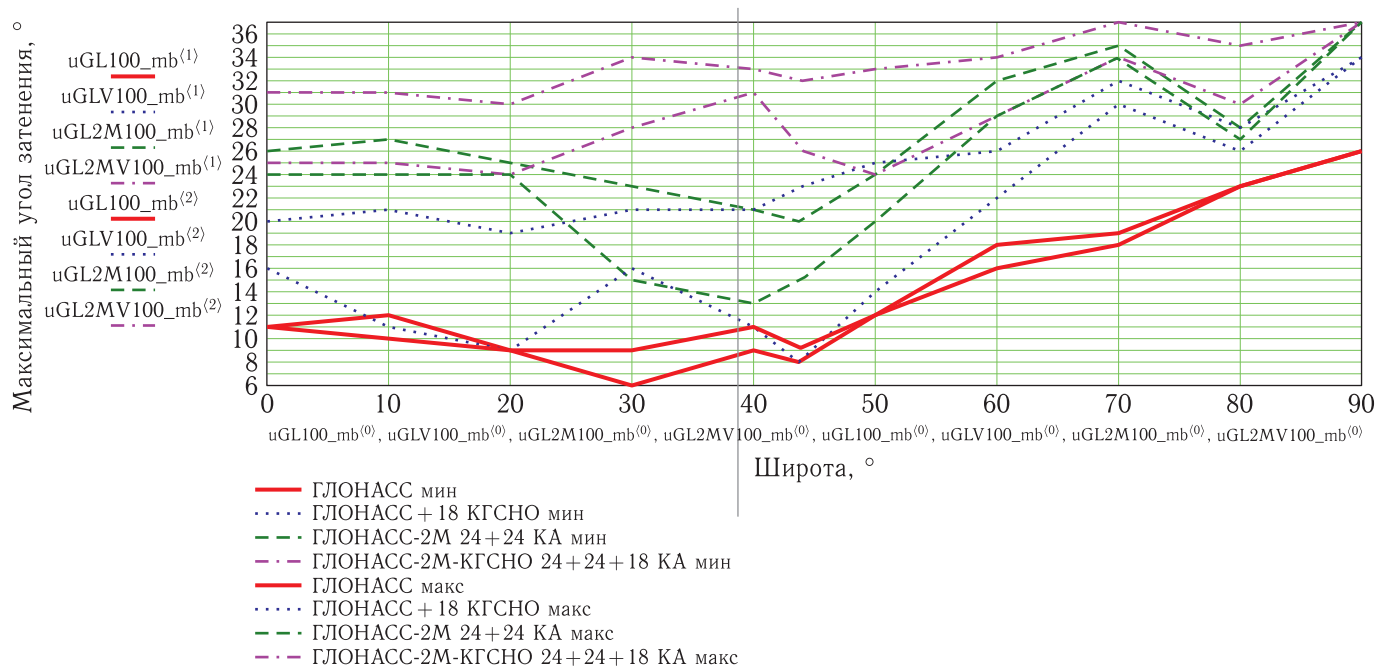


Рис. 13. Графики зависимости разброса по долоте максимального угла затенения систем ГЛОНАСС, ГЛОНАСС-2М и ГЛОНАСС-КГСНО для ПГФ ≤ 6 на 100% времени в зависимости от широты

Таблица 2. Стоимость единичного запуска РН «Протон-М» с РБ «Бриз-М»

	РН «Протон-М»	РБ «Бриз-М»	Головной обтекатель для РН	Предпусковые и пусковые работы	Итоговая стоимость запуска
Цена, млн руб.	1380	436	170	600	2586

Таблица 3. Стоимость развертывания второй группировки с КА типа «ГЛОНАСС-М»

	КА «ГЛОНАСС-М»	3 КА «ГЛОНАСС-М»	Стоимость запуска 3 КА «ГЛОНАСС-М» на РН «Протон-М» с РБ «Бриз-М»	Итоговая стоимость развертывания второй группировки с КА типа «ГЛОНАСС-М» при использовании РН «Протон-М» с РБ «Бриз-М»
Цена, млн руб.	846	2538	5124	40 992

Таблица 4. Стоимость развертывания высокоорбитального дополнения

	1 КА ВОД	2 КА ВОД	Стоимость запуска 2 КА ВОД на РН «Протон-М» с РБ «Бриз-М»	Итоговая стоимость развертывания высокоорбитального дополнения к системе ГЛОНАСС при использовании РН «Протон-М» с РБ «Бриз-М» (без учета цены ОКР)
Цена, млн руб.	846	1692	4278	38 502

Принимаем, что на высокую орбиту будут выводиться по два, а не три КА, как для орбиты ГЛОНАСС, с использованием РН «Протон-М» с РБ «Бриз-М».

В табл. 4 приведены данные о стоимости развертывания высокоорбитального дополнения к системе ГЛОНАСС при использовании РН «Протон-М» с РБ «Бриз-М».

По данным [4], на ОКР по разработке КА «ГЛОНАСС-К» и «ГЛОНАСС-М» было потрачено 14,0 млрд руб. Принимаем, что на разработку каждого типа КА было потрачено по 7 млрд руб. и как минимум столько же будет потрачено на ОКР по разработке КА высокоорбитального дополнения к системе ГЛОНАСС. Итоговая стоимость создания высокоорбитального дополнения к системе ГЛОНАСС при использовании РН «Протон-М» с РБ «Бриз-М» с учетом цены ОКР составит 45 502 млн руб.

Таким образом, стоимость создания высокоорбитального дополнения к системе ГЛОНАСС как минимум на 10% выше стоимости развертывания второй группировки КА типа «ГЛОНАСС-М».

Итак, среди рассмотренных двух вариантов повышения качества местоопределения более предпочтительным является развертывание второй группировки НКА типа «ГЛОНАСС-М».

## Список литературы

1. Брагинец В. Ф., Мещеряков В. М., Сухой Ю. Г. Сравнение вариантов построения орбитальной группировки ГЛОНАСС в целях совершенствования ее структуры для наблюдения навигационных спутников // *Космонавтика и ракетостроение*, 2017, вып. 1(94). С. 95–102.
2. Ватутин С. И. Оценка геометрического фактора для наземного потребителя системы ГЛОНАСС с высокоэллиптическим дополнением // *Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы*, 2016, т. 3, вып. 3. С. 12–28.
3. Глобальная навигационная система ГЛОНАСС. Интерфейсный контрольный документ. Навигационный радиосигнал в диапазонах L1, L2 (ред. 5.1). М., 2008.
4. Крылов А. М. Анализ космической деятельности Российской Федерации в период с 2001 по 2013 годы. С. 45. URL: [http://mosspaceclub.ru/3part/a\\_krilov.htm](http://mosspaceclub.ru/3part/a_krilov.htm), дата обращения 25.10.2017.
1. Braginetz V. F., Meshcheryakov V. M., Sukhoy Yu. G. Svravnenie variantov postroeniya orbital'noy gruppировки GLONASS v tselyakh sovershenstvovaniya ee struktury dlya nablyudeniya navigatsionnykh sputnikov [Comparison of options for building of the GLONASS orbital constellation in order to improve its structure for observation of navigation satellites]. *Kosmonavtika i raketostroenie* [Cosmonautics and rocket science], 2017, No. 1(94), pp. 95–102. (in Russian)
2. Vatutin S. I. Otsenka geometricheskogo faktora dlya nazemnogo potrebitelya sistemy GLONASS s vysokoellipticheskim dopolneniem [Estimation of Geometric Factor for a User of GLONASS System with Highly Elliptical Augmentation]. *Raketno-kosmicheskoe priborostroenie i informatsionnye sistemy* [Rocket-Space Device Engineering and Information Systems], 2016, Vol. 3, No. 3, pp. 12–28. (in Russian)
3. *Global'naya navigatsionnaya sistema GLONASS. Interfeysnyy kontrol'nyy dokument. Navigatsionnyy radiosignal v diapazonakh L1, L2 (redaktsiya 5.1)* [GLONASS Global Navigation System. Interface control document. Navigation radio signal in the L1, L2 bands (revision 5.1)]. Moscow, 2008. (in Russian)
4. Krylov A. M. *Analiz kosmicheskoy deyatel'nosti Rossiyskoy Federatsii v period s 2001 po 2013 gody* [Analysis of space activities of the Russian Federation in the period from 2001 to 2013]. p. 45. Available at: [http://mosspaceclub.ru/3part/a\\_krilov.htm](http://mosspaceclub.ru/3part/a_krilov.htm) (in Russian).

## References