

Повышение точности и доступности ГЛОНАСС для гражданских потребителей за счет высокоорбитального космического комплекса

© А.Г. Топорков

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

Представлены варианты построения высокоорбитального космического комплекса глобальной навигационной системы (ГЛОНАСС) в виде регионального дополнения орбитальной группировки ГЛОНАСС на высокоэллиптических орбитах. Для оценки навигационной обстановки на поверхности Земли предложено рассматривать виртуальное пространство потребителей навигационной информации, в качестве которых выбраны гражданские потребители. Представлен алгоритм расчета значений пространственного геометрического фактора и доступности. Для различных вариантов построения регионального дополнения орбитальной группировки получены численные значения глобального геометрического фактора, глобальной доступности навигации, среднего значения геометрического фактора при двух ограничениях угла места: более 5° и более 25°. Сформулировано предложение по дальнейшему развитию орбитальной группировки ГЛОНАСС, позволяющее обеспечить повышение точности позиционирования для потребителей навигационной информации.

Ключевые слова: ГЛОНАСС, высокоорбитальный космический комплекс, высокоэллиптическая орбита, геометрический фактор, доступность навигации, PDOP

Введение. Необходимость модернизации орбитальной группировки (ОГ) ГЛОНАСС обусловлена различными факторами, среди которых можно выделить:

– обеспечение конкурентоспособности ГЛОНАСС для формирования навигационного паритета и навигационной независимости Российской Федерации;

– эффективное функционирование ГЛОНАСС с учетом возрастающей потребности [1] в навигационных технологиях различных гражданских потребителей навигационной информации (ПНИ) в городах с плотной застройкой, в Арктическом регионе, а также на местности со сложным рельефом. В таких условиях ПНИ испытывают трудности приема радионавигационных сообщений от навигационного космического аппарата (НКА), находящихся под углами места менее 25°;

– необходимость повышения точности и доступности ГЛОНАСС и их устойчивости в условиях нештатного функционирования НКА;

– другие факторы.

Нештатное функционирование НКА может привести к его выводу из орбитальной группировки для проведения незапланированного технического обслуживания. Такая ситуация, однозначно, будет способствовать ухудшению точности и доступности ГЛОНАСС.

Необходимо учитывать, что модернизация ОГ ГЛОНАСС — задача многокритериальная, а при условии соблюдения требований и ограничений, обеспечивающих устойчивое и эффективное развитие ГЛОНАСС, существуют различные варианты совершенствования ее ОГ, в том числе построение высокоорбитального космического комплекса [2–4], который будет включать в себя НКА на высокоэллиптических орбитах (ВЭО).

В настоящее время Китай, Япония и Индия разворачивают свои региональные навигационные спутниковые системы BeiDou, QZSS и IRNSS соответственно. Анализируя современное состояние функционирующих региональных навигационных систем на высоких орбитах (QZSS, IRNSS и BeiDou), можно сделать однозначный вывод, что НКА на ВЭО способствует повышению таких основных показателей [5], как точность, доступность и целостность навигационного сигнала.

Цель данной работы — исследование возможности уменьшения геометрического фактора и повышения доступности системы ГЛОНАСС для гражданских потребителей на территории РФ и Арктического региона за счет использования НКА на ВЭО в качестве регионального дополнения.

Для достижения поставленной цели была решена задача по разработке алгоритма расчета значений пространственного геометрического фактора и доступности для различных вариантов баллистического построения регионального дополнения орбитальной группировки ГЛОНАСС. В качестве объекта исследования рассматривается штатная структура орбитальной группировки ГЛОНАСС с дополнительными НКА на высокоэллиптических орбитах.

Формирование дополнительного высокоорбитального космического комплекса (ВКК) к основной ОГ в сочетании с запуском новых навигационных космических аппаратов ГЛОНАСС-К и перспективных НКА ГЛОНАСС-К2 позволит повысить точность и доступность навигации, в том числе значительно улучшить эквивалентную погрешность псевдодальности (ЭПД) за счет космического сегмента (*Signal in Space User Range Error, SIS URE*). Повышение точности навигации, очевидно, позволяет уменьшить погрешность определения координат потребителя навигационной информации. Такую погрешность можно представить в следующем виде:

$$\delta = PDOP \cdot UERE,$$

где δ — погрешность определения координат ПНИ в пространстве; *PDOP* (*Position Dilution of Precision*) — пространственный геометрический фактор [6]; *UERE* (*User Equivalent Range Error*) — приведенная ошибка измерений псевдодальности.

Таким образом, пространственный геометрический фактор *PDOP* используется для пересчета эквивалентной погрешности псевдодаль-

ности URE в погрешности пространственных навигационных определений ПНИ.

Эквивалентная погрешность псевдодальности ПНИ (URE) является функцией, которая зависит от нескольких параметров:

$$URE = f(SIS\ URE, UAE, UEE),$$

где $SIS\ URE$ — эквивалентная погрешность псевдодальности (ЭПД) за счет космического сегмента; UAE — погрешность псевдодальности, обусловленная средой распространения сигнала; UEE — погрешность псевдодальности, вызванная условиями приема навигационных сигналов в наземной аппаратуре и погрешностями аппаратуры спутниковой навигации.

Учитывая вышеизложенное, можно заключить, что обеспечение конкурентоспособности ГЛОНАСС обусловлено необходимостью развивать и модернизировать саму структуру ее орбитальной группировки в части ее расширения и создания дополнений на других орбитах, что, несомненно, приведет к повышению $PDOP$ и доступности. Развитие и модернизация структуры орбитальной группировки ГЛОНАСС возможны в двух направлениях — глобальном и региональном [7].

В рамках глобального развития [8–12] структуры орбитальной группировки ГЛОНАСС предполагается увеличение общего количества НКА на каждой орбите, используемой текущей ОГ ГЛОНАСС в настоящее время, для чего потребуется перераспределение КА [13], либо увеличение количества рабочих плоскостей уже используемой ОГ системы, что позволит при выведении новых НКА не изменять положения функционирующих НКА.

В рамках регионального развития структуры орбитальной группировки ГЛОНАСС предполагается использование геосинхронных орбит для создания регионального дополнения системы ГЛОНАСС в виде высокоорбитального космического комплекса [14–17]. В данном случае орбиты следует выбирать таким образом, чтобы трассы подспутниковых точек и апогей пролегали над территорией России и максимально ее охватывали. Такой способ позволит повысить доступность навигации при использовании ОГ ГЛОНАСС в целом для выбранного региона. Исследованию данного направления посвящена дальнейшая работа. В этой статье рассматривается вариант регионального дополнения ГЛОНАСС на высокоэллиптических орбитах (ВЭО), являющихся геосинхронными орбитами.

К их преимуществам можно отнести возможность обслуживания территории большой площади, чем обеспечивают КА, размещенные на геостационарных орбитах (ГСО), а также потребителей навигационной информации в более высоких широтах, чем с КА на ГСО.

Что касается недостатков ВЭО, то апогей спутников на ВЭО значительно выше, чем у ГСО, поэтому появляются дополнительные требования к мощности передатчика [18].

Следовательно, ВКК ГЛОНАСС позволит решать следующие задачи на всей территории РФ, включая Арктический регион:

- повышение точности и доступности координатно-временного и навигационного обеспечения (КВНО) ПНИ в сложных условиях;
- обеспечение оперативного (практически в реальном масштабе времени) КВНО;
- уменьшение значения пространственного геометрического фактора $PDOP$;
- решение задач функционального дополнения;
- ретрансляция эфемеридно-временной информации (ЭВИ);
- осуществление приема и передачи командно-программной и телеметрической информации с НКА номинальной (среднеорбитальной) ОГ ГЛОНАСС.

Объект исследования. В данной статье объектом исследования является конфигурация ОГ ГЛОНАСС, состоящая из 24 среднеорбитальных (номинальных) НКА и дополнительно из шести НКА на ВЭО. Орбитальные параметры НКА на ВЭО подобраны таким образом, что на поверхности Земли формируются две трассы по три НКА. При этом рассматриваются орбиты двух типов [19, 15]: 1-го типа — эксцентриситет равен 0,33 и 2-го типа — эксцентриситет равен 0,072.

Таким образом, в работе рассматриваются навигационные характеристики следующих орбитальных группировок:

- номинальная конфигурация ОГ ГЛОНАСС (всего 24 НКА);
- номинальная конфигурация ОГ ГЛОНАСС (24 НКА) с дополнением из шести НКА на орбите 1-го типа (всего 30 НКА);
- номинальная конфигурация ОГ ГЛОНАСС (24 НКА) с дополнением из шести НКА на орбите 2-го типа (всего 30 НКА).

Трассы дополнений НКА на ВЭО орбит 1-го и 2-го типа представлены на рис. 1 и 2 соответственно. Шаг сетки по широте φ и по долготе λ составляет 10° .

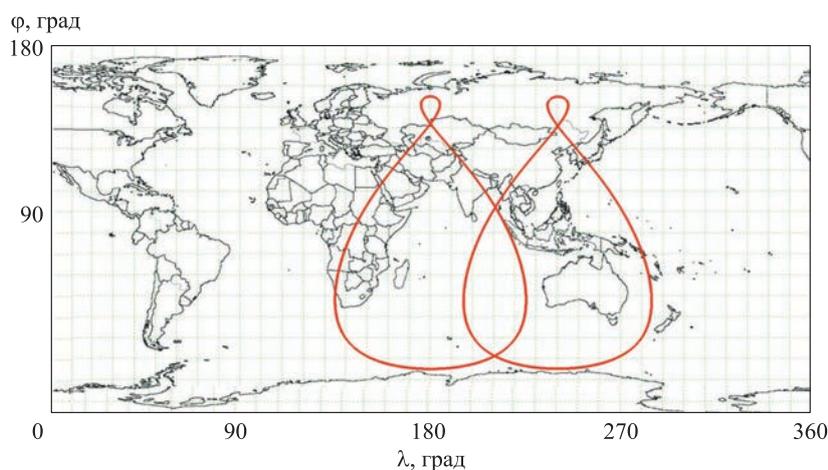


Рис. 1. Трассы полета НКА 1-го типа

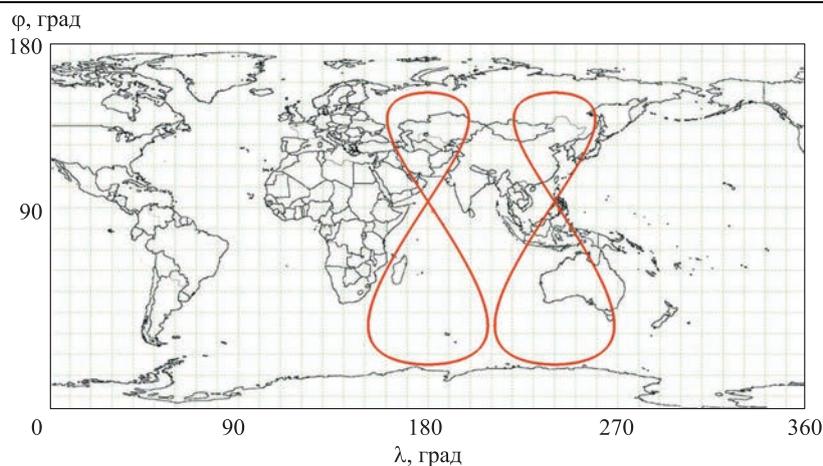


Рис. 2. Трассы полета НКА 2-го типа

Виртуальное пространство потребителей навигационной информации. Для качественной и количественной оценки навигационной обстановки на поверхности Земли для ПНИ было сформировано виртуальное пространство потребителя навигационной информации (ВП ПНИ). Для наглядности на рис. 3 представлено ВП ПНИ с разбиением земного шара по широте и долготе на области с шагом 10° .

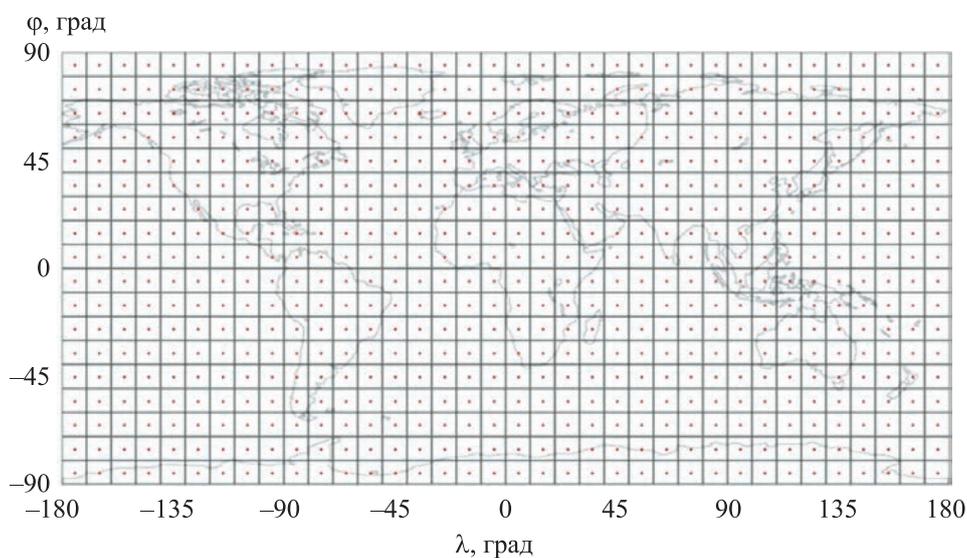


Рис. 3. Пример виртуального пространства потребителей навигационной информации

Такой подход позволяет разделить поверхность земного шара на виртуальные прямоугольные области, в центре которых располагается навигационная аппаратура ПНИ. Итог такого разбиения —

N сформированных виртуальных ПНИ с конкретными широтой φ_i и долготой λ_j , для которых рассчитываются геометрический фактор и доступность навигации. При этом $i = 1, 2, 3, \dots, i_k$; $j = 1, \dots, j_k$; $i_k = 180^\circ$; $j_k = 360^\circ$. Тогда количество виртуальных ПНИ

$$N = \frac{i_k \cdot j_k}{\Delta \cdot \Delta}.$$

В данной работе расчеты проведены с учетом разбиения поверхности земного шара с равномерным шагом $\Delta = 5^\circ$ по долготе и широте, что обеспечивает 2592 виртуальных ПНИ.

Алгоритм расчета. Расчет геометрического фактора и доступности осуществляется в три этапа.

Этап I. Задаются исходные данные.

1. Формируется ВП ПНИ в виде земного шара, который делится по поверхности на элементы.

2. Границы ВП ПНИ задаются предельными узлами сетки по широте φ_i ($\varphi_{\min} = -90^\circ$ и $\varphi_{\max} = 90^\circ$) и долготе λ_j ($\lambda_{\min} = -180^\circ$ и $\lambda_{\max} = 180^\circ$) с шагом по широте Δ_φ и по долготе Δ_λ .

Этап II. Рассчитывается геометрический фактор.

1. Сначала для каждого виртуального ПНИ рассчитывается мгновенный геометрический фактор $PDOP_instant(\varphi_i, \lambda_j, t_n)$, $t_n = 1, \dots, n_k$, при заданном временном шаге Δt на заданном интервале T . Расчет мгновенного геометрического фактора можно проводить в соответствии с [19].

2. Далее рассчитывается локальный геометрический фактор для ПНИ с географическими координатами (φ_i, λ_j) . Этот фактор рассчитывается на основе мгновенного геометрического фактора и определяется также в каждой точке (φ_i, λ_j) рассматриваемой области, но расчет проводится не на каждом шаге интегрирования, а для всего исследуемого временного периода.

Из массивов рассчитанных мгновенных геометрических факторов $PDOP_instant(\varphi_i, \lambda_j, t_n)$ выбираются n значений с доверительной вероятностью $P = 0,95$ в следующей последовательности:

1) определяется среднее арифметическое значение каждой выборки

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i,$$

где n — число измерений, например, для $T = 1$ сут и $\Delta t = 1$ мин — $n = 1440$; x_i — $PDOP_instant(\varphi_i, \lambda_j, t_n)$;

2) для каждой выборки рассчитывается СКО

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2};$$

3) вычисляется доверительный интервал на основе распределения Стьюдента по формуле

$$P \left\{ \left| \bar{x} - Q \right| < \frac{t_p \sigma}{\sqrt{n}} \right\} = 0,95, \quad (2)$$

где Q — истинное значение геометрического фактора; t_p — коэффициент Стьюдента, зависящий от уровня доверительной вероятности (0,95) и числа измерений (определяется по таблице Стьюдента).

Формулу (2) можно представить в виде

$$P \left\{ \bar{x} - \frac{t_p \sigma}{\sqrt{n}} < Q < \bar{x} + \frac{t_p \sigma}{\sqrt{n}} \right\} = 0,95.$$

Таким образом, при известных правой $\left(\bar{x} - \frac{t_p \sigma}{\sqrt{n}} \right)$ и левой $\left(\bar{x} + \frac{t_p \sigma}{\sqrt{n}} \right)$ границах интервала выбираются все значения $PDOP_instant(\varphi_i, \lambda_j, t_n)$, удовлетворяющие условию (2), а также их количество n_k .

При этом локальные геометрические факторы

$$PDOP_local(\varphi_i, \lambda_j) = \frac{1}{n_k} \sum_{n=1}^{n_k} PDOP_instant(\varphi_i, \lambda_j, t_n),$$

где n_k — количество точек массива $PDOP_instant(\varphi_i, \lambda_j, t_n)$, взятых с доверительной вероятностью ($P = 0,95$); $PDOP_instant(\varphi_i, \lambda_j, t_n)$ — массив значений, отсортированный по возрастанию.

3. Рассчитывается глобальный геометрический фактор с учетом площади поверхности и локального геометрического фактора [20–23]:

$$PDOP_global = \frac{1}{\sum_{i=1}^{i_k} \sum_{j=1}^{j_k} \Delta S_{ij}} \sum_{i=1}^{i_k} \sum_{j=1}^{j_k} PDOP_local(\varphi_i, \lambda_j) \Delta S_{ij},$$

где ΔS_{ij} — элемент площади поверхности,

$$\Delta S_{ij} = \frac{\cos \varphi_i + \cos(\varphi_i + \Delta \varphi)}{2} \Delta \varphi \Delta \lambda$$

($\Delta \varphi$ — шаг по широте; $\Delta \lambda$ — шаг по долготе).

Этап III. Определяется доступность навигации для ПНИ.

1. Для каждого виртуального ПНИ рассчитывается мгновенная доступность — $AV_instant(\varphi_i, \lambda_j, t_n)$, $t_n = 1, 2, 3, \dots, n_k$, при заданном временном шаге Δt на заданном интервале T :

$$AV_instant(\varphi_i, \lambda_j, t_n) = \begin{cases} 1 & \text{при } PDOP_instant(\varphi_i, \lambda_j, t_n) \leq 6; \\ 0 & \text{при } PDOP_instant(\varphi_i, \lambda_j, t_n) > 6. \end{cases}$$

2. Вычисляется локальная доступность для ПНИ с географическими координатами (φ_i, λ_j) по формуле

$$AV(\varphi_i, \lambda_j) = \frac{1}{n_k} \sum_{n=1}^{n_k} AV(\varphi_i, \lambda_j, t_n).$$

3. Определяется глобальная доступность по поверхности Земли

$$AV(PDOP \leq 6) = \frac{1}{4\pi} \sum_{i=1}^{ik} \sum_{j=1}^{jk} AV(\varphi_i, \lambda_j) \Delta S_{ij}.$$

Алгоритм расчета значений $PDOP$ и доступности, описание которого приведено выше, представлен на рис. 4. На базе этого алгоритма был разработан программный комплекс для проведения расчетов доступности и геометрического фактора [24].

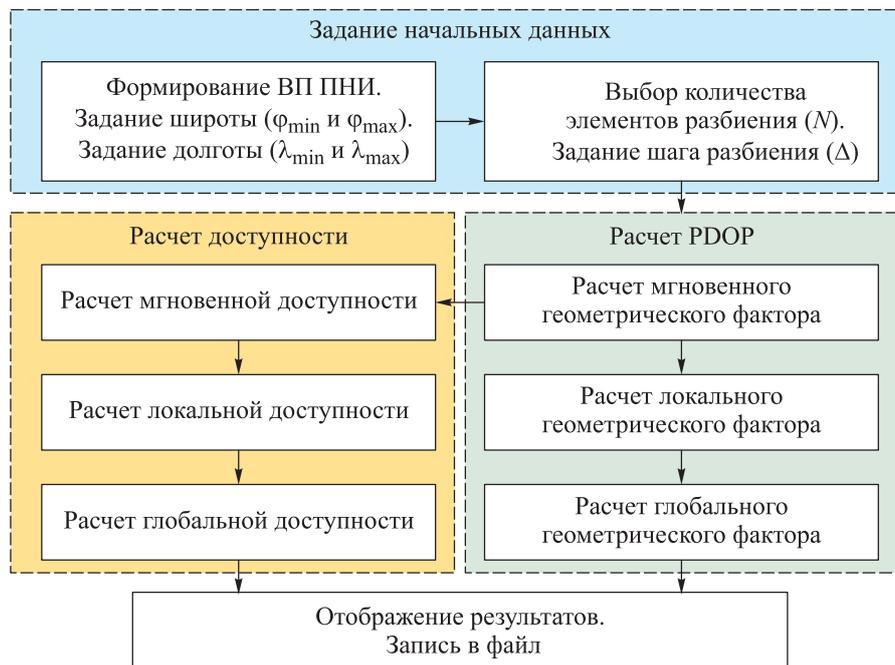


Рис. 4. Общий алгоритм расчета $PDOP$ и доступности

В рамках моделирования проведено сравнение основных характеристик точности и глобальной доступности $glob-AV$ по следующим показателям [10, 25]:

- глобальная доступность по условию $PDOP \leq 6$ для открытой местности с ограничением по углу места $\varepsilon \geq 5^\circ$;
- глобальная доступность повышенной точности по условию $PDOP \leq 2$ для открытой местности с ограничениями по углу места $\varepsilon \geq 5^\circ$;
- среднее значение пространственного геометрического фактора $PDOP$ для угла места $\varepsilon \geq 5^\circ$;
- глобальная доступность по условию $PDOP \leq 6$ для городской и горной местности с ограничениями по углу места $\varepsilon \geq 25^\circ$;
- глобальная доступность повышенной точности по условию $PDOP \leq 2$ для открытой местности с ограничениями по углу места $\varepsilon \geq 25^\circ$;
- среднее значение пространственного геометрического фактора $PDOP$ для угла места $\varepsilon \geq 25^\circ$.

Результаты имитационного моделирования. На основе полученного алгоритма было построено распределение значения пространственного геометрического фактора, доступности навигации и количества видимых НКА на территории всего земного шара в зависимости от широты γ и долготы λ в среднем за период звездных суток (рис. 5–10).

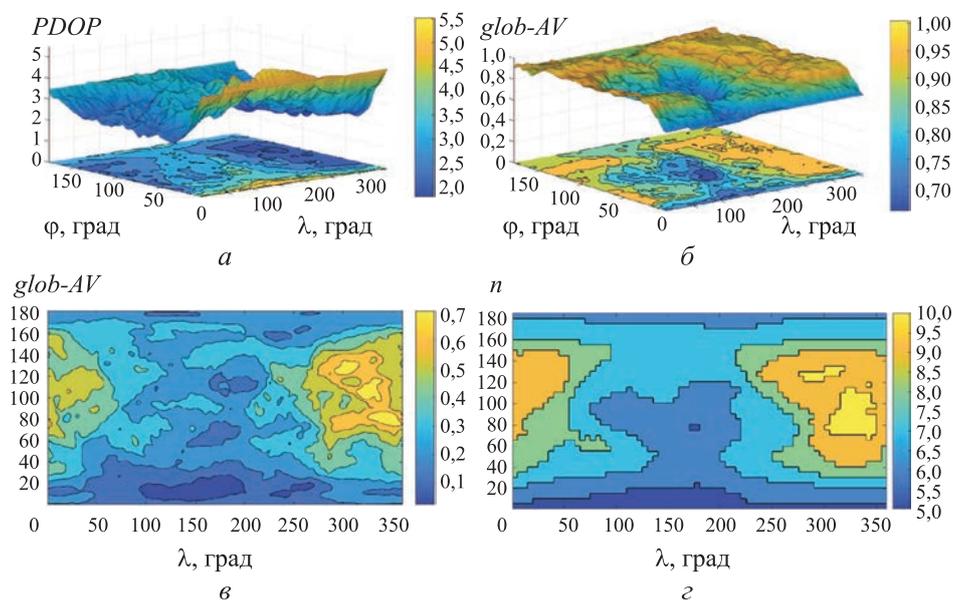


Рис. 5. Навигационные характеристики для номинальной структуры ОГ ГЛОНАСС при $\varepsilon \geq 5^\circ$:

- a* — $PDOP$; *б* — глобальная доступность (*glob-AV*) навигации по условию $PDOP \leq 6$;
- в* — глобальная доступность навигации по условию $PDOP \leq 2$; *г* — число видимых НКА

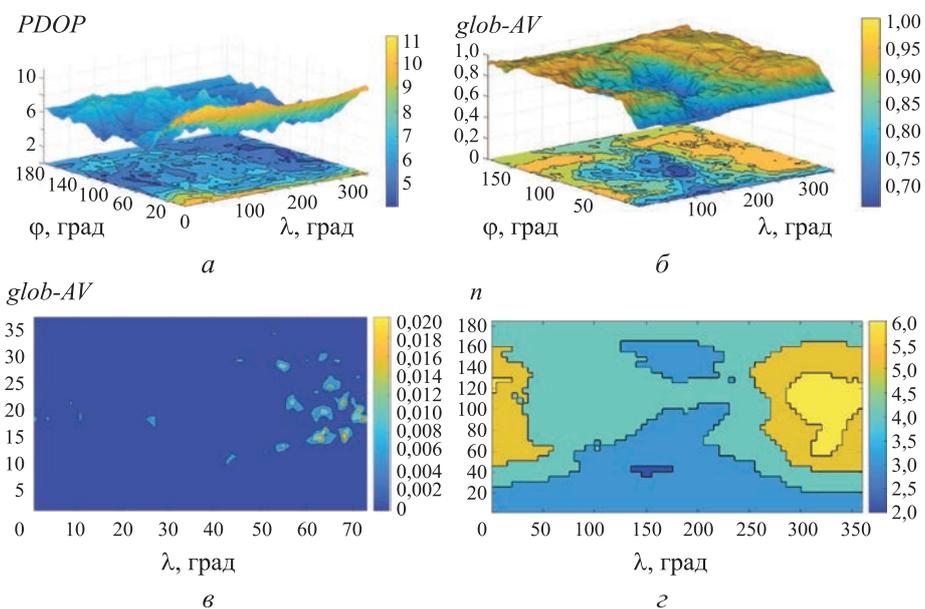


Рис. 6. Навигационные характеристики для номинальной структуры ОГ ГЛОНАСС при $\varepsilon \geq 25^\circ$:

a — *PDOP*; *б* — глобальная доступность навигации по условию $PDOP \leq 6$; *в* — глобальная доступность навигации по условию $PDOP \leq 2$; *г* — число видимых НКА

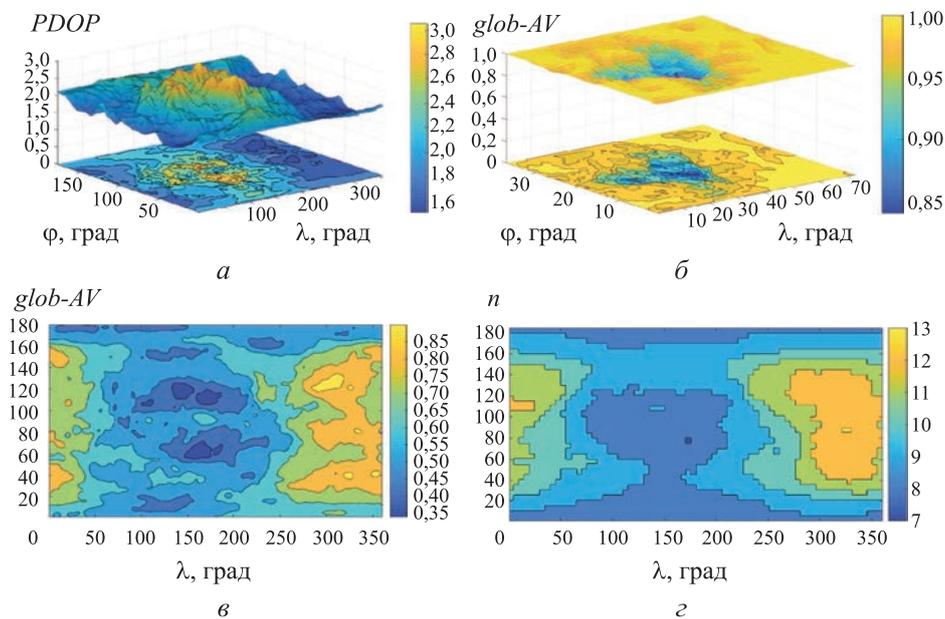


Рис. 7. Навигационные характеристики для структуры ОГ ГЛОНАСС + 6 КА ВЗО 1-го типа при $\varepsilon \geq 5^\circ$:

a — глобальный *PDOP*; *б* — глобальная доступность навигации по условию $PDOP \leq 6$; *в* — глобальная доступность навигации по условию $PDOP \leq 2$; *г* — число видимых НКА

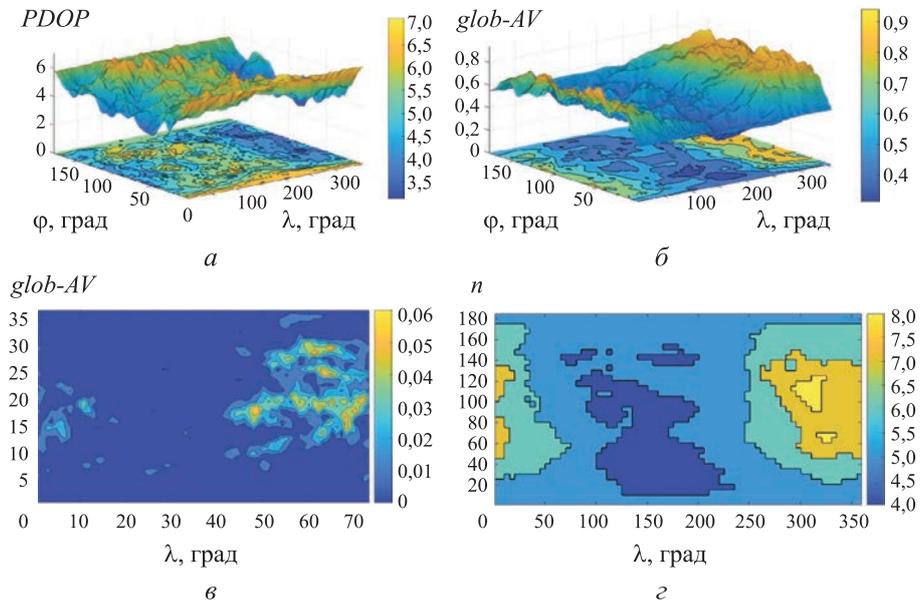


Рис. 8. Навигационные характеристики для структуры ОГ ГЛОНАСС + 6 КА ВЭО 1-го типа при $\varepsilon \geq 25^\circ$:

a — PDOP; *б* — глобальная доступность навигации по условию PDOP ≤ 6; *в* — глобальная доступность навигации по условию PDOP ≤ 2; *г* — число видимых НКА

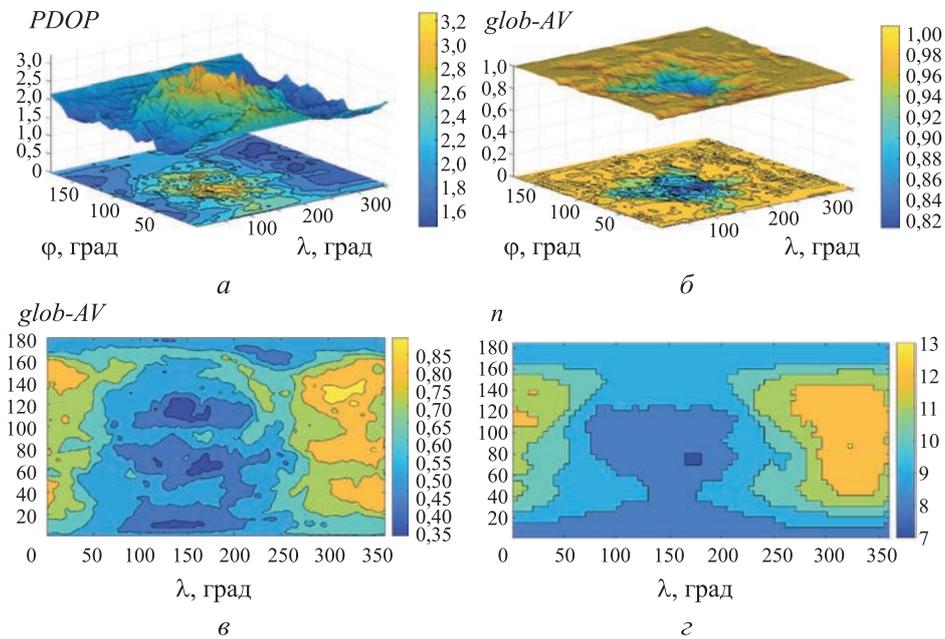


Рис. 9. Навигационные характеристики для структуры ОГ ГЛОНАСС + 6 КА ВЭО типа QZSS при $\varepsilon \geq 5^\circ$:

a — глобальный PDOP; *б* — глобальная доступность навигации по условию PDOP ≤ 6; *в* — глобальная доступность навигации по условию PDOP ≤ 2; *г* — число видимых НКА

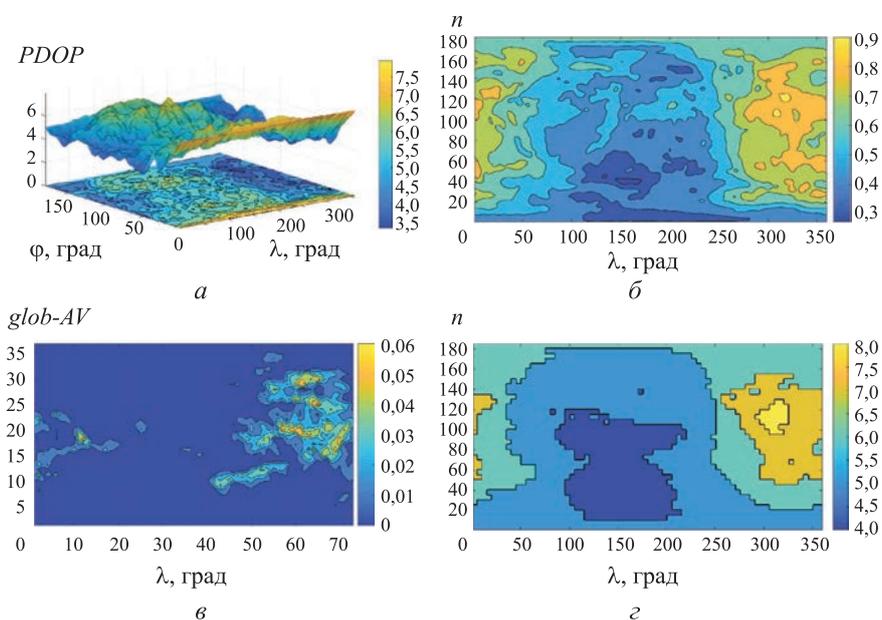


Рис. 10. Навигационные характеристики для структуры ОГ ГЛОНАСС + 6 КА ВЭО типа QZSS при $\varepsilon \geq 25^\circ$:

a — *PDOP*; *б* — глобальная доступность навигации по условию $PDOP \leq 6$; *в* — глобальная доступность навигации по условию $PDOP \leq 2$; *г* — число видимых НКА

Рассчитанные значения навигационных характеристик для различных вариантов построения ОГ ГЛОНАСС представлены в таблице. Анализируя представленные в таблице результаты, можно оценить влияние региональных дополнений на навигационные характеристики для гражданских ПНИ. Так, к ОК ГЛОНАСС региональное дополнение на орбите 1-го типа позволяет улучшить навигацию для ПНИ по сравнению с номинальной ОГ ГЛОНАСС, а именно можно обеспечить:

- при условии $\varepsilon \geq 5^\circ$ (см. рис. 7) увеличение глобальной доступности по условию $PDOP \leq 6$ примерно на 7 %, а по условию $PDOP \leq 2$ — на 61 %; уменьшение среднего значения *PDOP* примерно на 38 %;

- при $\varepsilon \geq 25^\circ$ (см. рис. 8) увеличение глобальной доступности по условию $PDOP \leq 6$ примерно на 73 %, а по условию $PDOP \leq 2$ — на 967 %; уменьшение среднего значения *PDOP* примерно на 32 %.

Региональное дополнение типа QZSS позволяет также обеспечить улучшение навигации для ПНИ по сравнению с номинальной ОГ ГЛОНАСС:

- при $\varepsilon \geq 5^\circ$ (см. рис. 9) увеличение глобальной доступности по условию $PDOP \leq 6$ примерно на 7 %, а по условию $PDOP \leq 2$ — на 45 %, уменьшение среднего значения *PDOP* примерно на 32 %;

– при $\varepsilon \geq 25^\circ$ (см. рис. 10) увеличение глобальной доступности по условию $PDOP \leq 6$ примерно на 46 %, а по условию $PDOP \leq 2$ — на 384 %, уменьшение среднего значения $PDOP$ примерно на 16 %.

Навигационные характеристики вариантов построения системы ГЛОНАСС на территории РФ

Показатель	Состав орбитальной группировки		
	ГЛОНАСС (24 НКА)	ГЛОНАСС + орбита 1-го типа	ГЛОНАСС + орбита 2-го типа
$\varepsilon \geq 5^\circ$			
Глобальная доступность по условию $PDOP \leq 6$	0,9330	0,9962	0,9948
Глобальная доступность повышенной точности по условию $PDOP \leq 2$	0,5685	0,9186	0,8257
Среднее значение $PDOP$	2,4651	1,5213	1,6793
$\varepsilon \geq 25^\circ$			
Глобальная доступность по условию $PDOP \leq 6$	0,5293	0,9150	0,7743
Глобальная доступность повышенной точности по условию $PDOP \leq 2$	0,0058	0,0619	0,0281
Среднее значение $PDOP$	5,3529	3,6501	4,4766

Заключение. Анализ результатов математического моделирования для рассмотренных дополнений на ВЭО показал, что в интересах гражданских потребителей при использовании номинальной ОГ ГЛОНАСС наблюдается снижение среднего значения $PDOP$ по углу места $\varepsilon \geq 5^\circ$ в диапазоне широт от -15° до $+35^\circ$. Доступность навигации при использовании номинальной ОГ ГЛОНАСС с ограничением по углу места $\varepsilon \geq 25^\circ$ не превосходит значения 0,55 в широтном диапазоне от -50° до $+50^\circ$. При этом ГЛОНАСС на территории РФ обладает ограниченными возможностями навигации в сложных условиях ($\varepsilon \geq 25^\circ$) плотной городской застройки, гористой местности и ландшафта. Если сравнить дополнения на ВЭО по основным характеристикам точности и доступности, то можно сделать вывод, что дополнение для орбиты 1-го типа превосходит дополнение типа QZSS, особенно в условиях городской застройки и гористой местности.

Таким образом, региональные дополнения, безусловно, позволяют улучшить уровень навигационных определений для гражданских ПНИ на территории РФ. Если рассматривать высокоорбитальный космический комплекс в качестве регионального дополнения к ОГ

ГЛОНАСС, то это обеспечит преимущество на территории РФ перед другими ОГ, такими как GPS, GALILEO и BeiDou. В отношении дальнейшего гипотетического регионального развития структуры орбитальной группировки ГЛОНАСС на основе высокоорбитального космического комплекса можно предложить использовать геосинхронные орбиты 1-го типа с эксцентриситетом, равным $\sim 0,33$. Однако нужно понимать, что задача выбора регионального дополнения является многокритериальной, а значит, не должна ограничиваться только критериями по основным характеристикам точности и доступности.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Лысенко Л.Н., Корянов В.В., Топорков А.Г. Об оценке требований к точности спутниковой навигации на основе анализа современного состояния КВНО потребительских систем гражданского назначения. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2015, № 5, с. 47–61.
- [2] Стратегическое развитие Государственной корпорации по космической деятельности «РОСКОСМОС» на период до 2025 года и перспективу до 2030 года. *РОСКОСМОС*. URL: <https://www.roscosmos.ru/media/files/docs/2017/dokladstrategia.pdf> (дата обращения 10.03.2023).
- [3] Пути развития на 2019 год: высокоорбитальный ГЛОНАСС повысит доступность. *Информационно-аналитический центр координатно-временного и навигационного обеспечения*. URL: <https://glonass-iac.ru/news/gnss/3520/> (дата обращения 10.03.2023).
- [4] Высокоорбитальный сегмент ГЛОНАСС: планы и реалии. *Вестник ГЛОНАСС*, 2020, № 8 (60), с. 46–51.
- [5] *ГОСТ Р 52928–2010. Система спутниковая навигационная глобальная. Термины и определения*. Москва, Стандартинформ, 2011, 11 с.
- [6] Тяпкин В.Н., Гарин Е.Н. *Методы определения навигационных параметров подвижных средств с использованием спутниковой радионавигационной системы ГЛОНАСС*. Монография. Красноярск, Изд-во Сибирского федерального университета, 2012, 260 с.
- [7] Ватутин С.И., Бирюков А.А., Курков И.К. Сравнительный анализ глобальных дополнений системы ГЛОНАСС. *Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы*, 2017, т. 4, вып. 4, с. 3–14. <https://doi.org/10.17238/issn2409-239.2017.4.3>
- [8] Ступак Г.Г., Ревнивых С.Г., Игнатович Е.И., Куршин В.В. Выбор структуры орбитальной группировки перспективной системы ГЛОНАСС. *Исследования наукограда*, 2013, № 3–4 (6), с. 3–11.
- [9] Ступак Г.Г., Ревнивых С.Г., Игнатович Е.И., Куршин В.В. Исследование вариантов совершенствования структуры орбитальной группировки ГНСС ГЛОНАСС до 2020 года и далее с учетом доведения ее состава к 2020 году до 30 КА. *Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнева*, 2013, № 6 (52), с. 23–31.
- [10] Ступак Г.Г., Лысенко Л.Н., Бетанов В.В., Звягин Ф.В. Состояние и перспективы совершенствования орбитальных структур навигационных спутниковых систем. *Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия Приборостроение*, 2014, № 1 (94), с. 3–18.

- [11] Шилко И.И., Волошко Ю.Б., Ружилова О.В., Анисимова О.А. Анализ вариантов модернизации структуры орбитальной группировки системы ГЛОНАСС для обеспечения ее конкурентоспособности. *Космические аппараты и технологии*, 2019, т. 3, № 1 (27), с. 5–12. <https://doi.org/10.26732/2618-7957-2019-1-5-12>
- [12] Ватутин С.И. Пространственный геометрический фактор и развитие ГЛОНАСС. *Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы*, 2020, т. 7, вып. 3, с. 4–15. <https://doi.org/10.30894/issn2409-0239.2020.7.3.4.15>
- [13] 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, № 1 (94), с. 95–102.
- [14] Мещеряков В.М., Брагинец В.Ф., Сухой Ю.Г. Архитектура орбитальной группировки ГЛОНАСС, обеспечивающая глобальное выполнение перспективных требований по среднему значению пространственного геометрического фактора. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2018, вып. 10. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2018-10-1816>
- [15] Бетанов В.В., Ступак Г.Г., Куршин А.В., Куршин В.В. К вопросу построения региональной орбитальной группировки навигационной спутниковой системы ГЛОНАСС. *Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук*, 2016, № 3 (93), с. 122–129.
- [16] Зай Яр Вин. *Формирование облика орбитальной группировки дополнения ГЛОНАСС для улучшения характеристик спутниковой навигации региональных потребителей. Дис. ... канд. техн. наук*. Москва, 2021, 178 с.
- [17] Топорков А.Г., Корянов В.В., Гашимов Э.М. Исследование возможности повышения точности и доступности системы ГЛОНАСС за счет построения высокоорбитального космического комплекса. *Материалы XLV Академических чтений по космонавтике, посвященных памяти академика С.П. Королева и других выдающихся отечественных ученых — пионеров освоения космического пространства*. В 4 томах. Москва, 2021, т. 3, с. 88–90.
- [18] Мещеряков В.М., Брагинец В.Ф., Сухой Ю.Г. Анализ особенностей технической реализации дополняющего высокоорбитального космического комплекса ГЛОНАСС. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2019, вып. 2. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2019-2-1848>
- [19] 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.
- [20] Стандарт эксплуатационных характеристик открытого сервиса (СТЭХОС). Приложение В справочная информация. Редакция 2.2 (6.2019). Королев, 2019, 19 с. URL: <https://glonass-iac.ru/news/gnss/3520/> (дата обращения 10.03.2023).
- [21] Куршин В. В., Филимонова Д. В. Оптимальное использование космических аппаратов ГНСС в функциональных дополнениях SBAS и GBAS. *Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы*, 2021, т. 8, вып. 4, с. 31–35.
- [22] Карутин С.Н., Панов С.А., Болкунов А.И., Каплев С.А., Тнкозян В.Л. *Способ оценки эксплуатационных характеристик услуги абсолютной навигации системы ГЛОНАСС*. Пат. № 2722092 Российская Федерация, 2020, бюл. № 15, 48 с.

- [23] Болкунов А.И. *Научно-методологические основы комплексной оценки эффективности навигационных спутниковых систем. Дис. ... д-ра техн. наук.* Москва, 2021, 399 с.
- [24] Топорков А.Г. *СПУТНИК-ИВМ. ПЭВМ №2020617414* Российская Федерация, опублик. 06.07.2020.
- [25] Лысенко Л.Н., Разумный Ю.Н. Проектная баллистика спутниковых систем: состояние и перспективы. *Сб. докл. конф. «Баллистика вчера, сегодня, завтра».* Санкт-Петербург, ВКА им. А.Ф. Можайского, 2006, с. 98–110.

Статья поступила в редакцию 23.06.2023

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Топорков А.Г. Повышение точности и доступности системы ГЛОНАСС для гражданских потребителей за счет высокоорбитального космического комплекса. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2023, вып. 7.

<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2023-7-2294>

Топорков Алексей Геннадьевич — старший преподаватель кафедры «Динамика и управление полетом ракет и космических аппаратов» МГТУ им. Н.Э. Баумана.
e-mail: agtoporkov@bmstu.ru

Increasing accuracy and availability of the GLONASS system for civil users by introducing the high orbital space complex

© A.G. Toporkov

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

The paper considers options for constructing the GLONASS system high-orbit space complex in the high elliptical orbits, as the regional addition to the GLONASS orbital constellation. To assess navigation situation on the Earth's surface, it proposes to consider the virtual consumer space for the navigation information. Civil consumers are considered as the navigation information consumers. An algorithm for calculating the values of spatial geometric factor and accessibility is presented. For various options in ballistic construction of the orbital constellation regional addition, numerical values were obtained of global geometric factor, global navigation accessibility and average geometric factor with two restrictions on the elevation angle: more than 5 degrees and more than 25 degrees. A proposal was formulated on the issue of the GLONASS system orbital constellation further development making it possible to improve positioning accuracy for the navigation information consumers.

Keywords: *GLONASS, high-orbit space complex, high elliptical orbit, geometric factor, navigation accessibility, PDOP*

REFERENCES

- [1] Lysenko L.N., Koryanov V.V., Toporkov A.G. Ob otsenke trebovaniya k tochnosti sputnikovoy navigatsii na osnove analiza sovremennogo sostoyaniya KVNO potrebitelskikh sistem grazhdanskogo naznacheniya [Evaluation of satellite navigation accuracy requirements based on the analysis of the current state of commercial coordinate and time navigation support systems]. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Seriya Mashinostroenie — Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Mechanical Engineering*, 2015, no. 5, pp. 47–61.
- [2] Strategicheskoe razvitie Gosudarstvennoy korporatsii po kosmicheskoy deyatel'nosti "ROSKOSMOS" na period do 2025 goda i perspektivy do 2030 goda [Strategic development of the State Space Corporation "Roscosmos" for the period up to 2025 and up to 2030]. *Roscosmos*. Available at: <https://www.roskosmos.ru/media/files/docs/2017/dokladstrategia.pdf> (accessed March 10, 2023).
- [3] Puti razvitiya na 2019 god: vysokoorbitalnyi GLONASS povysit dostupnost [Pathways for 2019: high-orbit GLONASS will increase accessibility]. *Informatsionno-analiticheskiy tsentr koordinatno-vremennogo i navigatsionnogo obespecheniya* [Information and analytical center for coordination, time and navigation support]. Available at: <https://glonass-iac.ru/news/gnss/3520/> (accessed March 10, 2023).
- [4] Vysokoorbitalnyi segment GLONASS: plany i realii [GLONASS high-orbit segment: plans and realities]. *Vestnik GLONASS — The GLONASS Herald*, 2020, no. 8 (60), pp. 46–51.
- [5] *GOST R 52928–2010. Sistema sputnikovaya navigatsionnaya globalnaya. Terminy i opredeleniya* [GOST R 52928–2010. Global navigation satellite system. Terms and definitions]. Moscow, Standartinform Publ., 2011, 11 p.

- [6] Tyapkin V.N., Garin E.N. *Metody opredeleniya navigatsionnykh parametrov podvizhnykh sredstv s ispolzovaniem sputnikovoy radionavigatsionnoy sistemy GLONASS* [Methods for determining navigation parameters of the mobile vehicles using the GLONASS satellite radio navigation system]. Krasnoyarsk, Sibirskiy Federalnyi Universitet Publ., 2012, 260 p.
- [7] Vatutin S.I., Biryukov A.A., Kurkov I.K. Sravnitelnyi analiz globalnykh dopolneniy sistemy GLONASS [Comparative analysis of global augmentations to the GLONASS system]. *Raketno-kosmicheskoe priborostroyeniye i informatsionnye sistemy — Rocket-Space Device Engineering and Information Systems*, 2017, vol. 4, no. 4, pp. 3–14. <https://doi.org/10.17238/issn2409-239.2017.4.3>
- [8] Stupak G.G., Revnivykh S.G., Ignatovich E.I., Kurshin V.V. Vybory struktury orbitalnoy gruppировki perspektivnoy sistemy GLONASS [Choice of structure of constellation of the prospective system GLONASS]. *Issledovaniya naukograda — Naukograd Research*, 2013, no. 3–4 (6), pp. 3–11.
- [9] Stupak G.G., Revnivykh S.G., Ignatovich E.I., Kurshin V.V. Issledovanie variantov sovershenstvovaniya struktury orbitalnoy gruppировki GNSS GLONASS do 2020 goda i dalee s uchetom dovedeniya ee sostava k 2020 godu do 30 KA [Research of alternative methods of improvement of structure of orbital groups of GLONASS system till 2020 and further]. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta im. akademika M.F. Reshetneva — Vestnik SibSAU. Aerospace technologies and control systems*, 2013, no. 6 (52), pp. 23–31.
- [10] Stupak G.G., Lysenko L.N., Betanov V.V., Zvyagin F.V., Raykunov K.G. Sostoyaniye i perspektivy sovershenstvovaniya orbitalnykh struktur navigatsionnykh sputnikovyykh sistem [Status and development prospects of orbital structures of navigation satellite systems]. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Seriya Priborostroeniye — Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Instrument Engineering*, 2014, no. 1 (94), pp. 3–18.
- [11] Shilko I.I., Voloshko Yu.B., Ruzhilova O.V., Anisimova O.A. Analiz variantov modernizatsii struktury orbitalnoy gruppировki sistemy GLONASS dlya obespecheniya ee konkurentosposobnosti [Analysis of upgrade options for the structure of orbital grouping of the GLONASS system to ensure its competitiveness]. *Kosmicheskije apparaty i tekhnologii — Spacecraft and Technologies*, 2019, vol. 3, no. 1 (27), pp. 5–12. <https://doi.org/10.26732/2618-7957-2019-1-5-12>
- [12] Vatutin S.I. Prostranstvennyi geometricheskij faktor i razvitiye GLONASS. [Position dilution of precision and GLONASS development]. *Raketno-kosmicheskoe priborostroyeniye i informatsionnye sistemy — Rocket-Space Device Engineering and Information Systems*, 2020, vol. 7, no. 3, pp. 4–15. <https://doi.org/10.30894/issn2409-0239.2020.7.3.4.15>
- [13] Braginets V.F., Mescheryakov V.M., Sukhoy Yu.G. Sravneniye variantov postroyeniya orbitalnoy gruppировki GLONASS v tselyakh sovershenstvovaniya ee struktury dlya nablyudeniya navigatsionnykh sputnikov [Comparison variants of the GLONASS orbital construction in order to improve its structure for observation of navigation satellites]. *Kosmonavtika i raketostroeniye — Cosmonautics and Rocket Engineering*, 2017, no. 1 (94), pp. 95–102.
- [14] Mescheryakov V.M., Braginets V.F., Sukhoy Yu.G. Arkhitektura orbitalnoy gruppировki GLONASS, obespechivayuschaya globalnoye vypolneniye perspektivnykh trebovaniy po srednemu znacheniyu prostranstvennogo geometricheskogo faktora [The GLONASS orbit constellation architecture, which provides global fulfillment of promising requirements by the average

- value of the spatial geometric factor]. *Inzhenerny zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2018, iss. 10. <https://doi.org/10.18698/2308-6033-2018-10-1816>
- [15] Betanov V.V., Stupak G.G., Kurshin A.V., Kurshin V.V. K voprosu postroyeniya regionalnoy orbitalnoy gruppirovki navigatsionnoy sputnikovoy sistemy GLONASS [On the issue of building a regional orbital constellation of the GLONASS navigation satellite system]. *Izvestiya Rossiyskoy akademii raketnykh i artilleriyskikh nauk — Proceedings of the Russian Academy of Rocket and Artillery Sciences*, 2016, no. 3 (93), pp. 122–129.
- [16] Zay Yar Win. *Formirovaniye oblika orbitalnoy gruppirovki dopolneniya GLONASS dlya uluchsheniya kharakteristik sputnikovoy navigatsii regionalnykh potrebiteley. Dis. ... kand. tekhn. nauk* [Forming the shape of the GLONASS additional orbital constellation to improve satellite navigation characteristics for the regional users. Diss. ... Cand. Sc. (Eng.)]. Moscow, 2021, 178 p.
- [17] Toporkov A.G., Koryanov V.V., Gashimov E.M. Issledovanie vozmozhnosti povysheniya tochnosti i dostupnosti sistemy GLONASS za schet postroyeniya vysokoorbitalnogo kosmicheskogo kompleksa [Study of the possibility of increasing accuracy and availability of the GLONASS system by building a high-orbit space complex]. In: *Materialy XLV Akademicheskikh chteniy po kosmonavtike, posvyaschennykh pamyati akademika S.P. Koroleva i drugikh vydayuschikhsya otechestvennykh uchenykh — pionerov osvoeniya kosmicheskogo prostranstva* [Proceedings of the XLV Academic readings on cosmonautics dedicated to the memory of Academician S.P. Korolev and other outstanding domestic scientists — pioneers of the outer space exploration]. In 4 vols. Moscow, 2021, vol. 3, pp. 88–90.
- [18] Mescheryakov V.M., Braginets V.F., Sukhoy Yu.G. Analiz osobennostey tekhnicheskoy realizatsii dopolnyayuschego vysokoorbitalnogo kosmicheskogo kompleksa GLONASS [Analyzing the peculiar features of GLONASS system's complementary high-orbital space complex technical implementation]. *Inzhenerny zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2019, iss. 2. <https://doi.org/10.18698/2308-6033-2019-2-1848>
- [19] 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 priborostroyeniye i informatsionnye sistemy — Rocket-Space Device Engineering and Information Systems*, 2016, vol. 3, iss. 3, pp. 12–28.
- [20] *Standart ekspluatatsionnykh kharakteristik otkrytogo servisa (STEKHOS). Prilozhenie B, spravochnaya informatsiya. Redaktsiya 2.2 (6.2019)* [Open Service Performance Standard (OSPS). Annex B, background information. Ver. 2.2 (6.2019)]. Korolev, 2019, 19 p. Available at: <https://glonass-iac.ru/news/gnss/3520/> (accessed March 10, 2023).
- [21] Kurshin V.V., Filimonova D.V. Optimalnoe ispolzovanie kosmicheskikh apparatov GNSS v funktsionalnykh dopolneniyakh SBAS i GBAS [Optimal use of GNSS spacecraft in SBAS and GBAS functional additions]. *Raketno-kosmicheskoe priborostroyeniye i informatsionnye sistemy — Rocket-Space Device Engineering and Information Systems*, 2021, vol. 8, iss. 4, pp. 31–35.
- [22] Karutin S.N., Panov S.A., Bolkunov A.I., Kaplev S.A., Tnkozyan V.L. *Sposob otsenki ekspluatatsionnykh kharakteristik uslugi absolutnoy navigatsii sistemy GLONASS* [Method for assessing operational characteristics of the absolute navigation service of the GLONASS system]. Pat. no. 2722092 Russian Federation, 2020, bull. no. 15, 48 p.

- [23] Bolkunov A.I. *Nauchno-metodologicheskie osnovy kompleksnoy otsenki effektivnosti navigatsionnykh sputnikovykh system. Dis. ... d-ra tekhn. nauk* [Scientific and methodological basis for complex assessment of the satellite navigation systems efficiency. Diss. ... Dr. Sc. (Eng.)]. Moscow, 2021, 399 p.
- [24] Toporkov A.G. *SPUTNIK-IVM* [SPUTNIK-ICM]. PEVM No. 20206217414 [PC No. 2020617414], Russian Federation, publ. July 6, 2020.
- [25] Lysenko L.N., Razumny Yu.N. *Prikladnaya ballistika sputnikovykh sistem: sostoyanie i perspektivy* [Applied ballistics of satellite systems: status and prospects]. In: *Sb. dokl. konf. "Ballistika vchera, segodnya, zavtra"* [Collection of reports at the conference "Ballistics yesterday, today, tomorrow"]. Saint-Petersburg, Mozhaysky Military Academy Publ., 2006, pp. 98–110.

Toporkov A.G., Senior Lecturer, Department of Dynamics and Flight Control of Rockets and Spacecraft Flight, Bauman Moscow State Technical University.
e-mail: agtoporkov@bmstu.ru