

УДК 621.396

## МЕТОДИКА ПОСТРОЕНИЯ И АНАЛИЗ ПОЛЕЙ ТОЧНОСТИ ГЛОНАСС В ЗАДАННОЙ ЗОНЕ ВОЗДУШНОГО ПРОСТРАНСТВА

О.Н. СКРЫШНИК, Р.О. АРЕФЬЕВ, Н.Г. АСТРАХАНЦЕВА

На основе, разработанной в среде LabView, программы моделирования орбитального движения и выбора спутников рабочего созвездия предложена методика построения полей потенциальной точности ГЛОНАСС в заданной зоне воздушного пространства, базирующаяся на расчете геометрических факторов. Путем сравнения с данными натурных экспериментов и полунатурного моделирования оценена адекватность математической модели. Проведены исследования изменения геометрических факторов для маршрута Иркутск-Москва. Построены поля точности ГЛОНАСС в горизонтальной и вертикальной плоскостях для заданной зоны воздушного пространства.

**Ключевые слова:** ГЛОНАСС, геометрический фактор, математическая модель орбитального движения, поле потенциальной точности, навигационный спутник, зональная навигация, система координат.

### ВВЕДЕНИЕ

Согласно принятой концепции развития системы организации воздушного движения основным средством навигационного обеспечения всех этапов полета воздушных судов (ВС), включая заход на посадку и посадку, должны стать спутниковые системы навигации (ССН).

Современные ССН, такие как GPS и ГЛОНАСС, позволяют определять координаты ВС с точностью, удовлетворяющей требованиям зональной навигации, а при определенных условиях и требованиям точного захода на посадку.

Для решения задач аэронавигационного обеспечения ВС, прежде всего в рамках технологий зональной навигации *RNAV (Aerial Navigation)* и *Free Flight*, определенный практический интерес может представлять построение рабочих зон ССН – областей воздушного пространства, внутри которых погрешность определения навигационных параметров (местоположения, высоты полета), не выходит за заданные значения. Информация о расположении таких зон в заданном районе воздушного пространства позволит улучшить ситуационную осведомленность экипажей при выборе маршрутов полета при навигационном обеспечении от ССН.

Однако построение рабочих зон ССН представляет собой достаточно сложную задачу, поскольку спутники перемещаются относительно потребителей, а значит границы рабочих зон будут динамичными. Кроме того, на точность навигационных определений в ССН оказывает влияние весьма широкий спектр факторов, в том числе изменяющихся случайным образом, что приводит практически к нереализуемости задачи построения рабочих зон в ее классической постановке.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Одним из основных факторов, оказывающим существенное влияние на точность навигационных определений в ССН (исключая ионосферную задержку), является так называемый геометрический фактор (ГФ) *GDOP (Geometric Dilution of Precision)*, который зависит от взаимного положения ВС и навигационных спутников (НС), сигналы от которых поступают для обработки в приемнике ССН. ГФ является детерминированной величиной, поэтому именно его предлагается использовать для определения границ рабочих зон (полей потенциальной точности) ССН в заданной зоне воздушного пространства.

ГФ определяется выражением [1]:

$$GDOP = \sqrt{\text{tr} \left[ \left( H^T H \right)^{-1} \right]}, \quad (1)$$

где  $\text{tr}\{*\}$  обозначает след матрицы;  $H$  - матрица направляющих косинусов линии дальности потребитель-НС в прямоугольной геоцентрической системе координат  $OXYZ$ , начало которой совпадает с центром масс Земли, ось  $OX$  проходит через точку пересечения экватора и Гринвичского меридиана, ось  $OZ$  совпадает с осью вращения Земли.

Выражение для измеренной псевдодальности потребитель- $i$ -й НС имеет вид:

$$D_i = \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2} + c\Delta t_{ai} + c\Delta t_c, \quad (2)$$

где  $x_i, y_i, z_i$  - координаты  $i$ -го НС;  $x, y, z$  - координаты потребителя в системе координат  $OXYZ$ ;  $\Delta t_{ai}$  - неизвестная ионосферная задержка сигнала от  $i$ -го НС;  $\Delta t_c$  - ошибка синхронизации шкалы времени потребителя с системным временем ССН.

Тогда элементы  $i$ -й строки матрицы  $H$  (число строк определяется числом НС, до которых выполняются измерения) для псевдодальномерного режима работы ССН есть частные производные от выражения (2):

$$H_{i,1} = \frac{\partial D_i}{\partial x} \bigg|_{\substack{x=x_0 \\ y=y_0 \\ z=z_0 \\ \Delta t_c=0}}; \quad H_{i,2} = \frac{\partial D_i}{\partial y} \bigg|_{\substack{x=x_0 \\ y=y_0 \\ z=z_0 \\ \Delta t_c=0}}; \quad H_{i,3} = \frac{\partial D_i}{\partial z} \bigg|_{\substack{x=x_0 \\ y=y_0 \\ z=z_0 \\ \Delta t_c=0}}; \quad H_{i,4} = \frac{\partial D_i}{\partial \Delta t_c} \bigg|_{\substack{x=x_0 \\ y=y_0 \\ z=z_0 \\ \Delta t_c=0}}, \quad (3)$$

Различают следующие виды геометрического фактора, характеризующие точность определения координат потребителя: в пространстве ( $PDOP$ ), в горизонтальной плоскости ( $HDOP$ ), в вертикальной плоскости ( $VDOP$ ) и  $TDOP$  - характеризующий точность определения поправки к шкале времени потребителя. При этом:

$$\begin{aligned} GDOP^2 &= PDOP^2 + TDOP^2, \\ PDOP^2 &= HDOP^2 + VDOP^2. \end{aligned}$$

Закономерное движение НС по орбитам с известным периодом обращения позволяет рассчитывать значение ГФ для любого момента времени и для любой точки воздушного пространства, используя для этого значения эфемерид, получаемые из альманаха системы. Определение совокупности точек в пространстве, в которых значение ГФ является постоянным или лежит в заданных пределах, позволит построить поля потенциальной точности (рабочие зоны) ССН в горизонтальной (по  $HDOP$ ) и вертикальной (по  $VDOP$ ) плоскостях в заданных областях воздушного пространства.

ГФ, рассчитанные с использованием выражений (1) – (3), характеризуют точность определения координат в системе координат  $O_1X_1Y_1Z_1$  [2], начало которой т.  $O_1$  совпадает с положением потребителя, а оси параллельны осям прямоугольной геоцентрической системы координат  $OXYZ$ . Для практики необходимо определение вертикального и горизонтального ГФ в локальной геодезической системе координат  $O_1UNE$ , ось  $U$  которой направлена в геодезический зенит точки  $O_1$ , ось  $N$  - на север, ось  $E$  - на восток (рис. 1).

Преобразование координат точки из системы  $OXYZ$  в локальную геодезическую систему координат  $O_1UNE$  удовлетворяет выражению:

$$\begin{pmatrix} x_{UNE} \\ y_{UNE} \\ z_{UNE} \end{pmatrix} = M \cdot \begin{pmatrix} x-x_0 \\ y-y_0 \\ z-z_0 \end{pmatrix},$$

где  $L_0, B_0$  - геодезические координаты т.  $O_1$ ;  $x, y, z$  - координаты НС;  $x_0, y_0, z_0$  - координаты т.  $O_1$  в прямоугольной геоцентрической системе координат;

$$M = \begin{pmatrix} -\sin L_0 & \cos L_0 & 0 \\ -\cos L_0 \sin B_0 & -\sin L_0 \sin B_0 & \cos B_0 \\ \cos L_0 \cos B_0 & \sin L_0 \cos B_0 & \sin B_0 \end{pmatrix} - \text{оператор преобразования.}$$

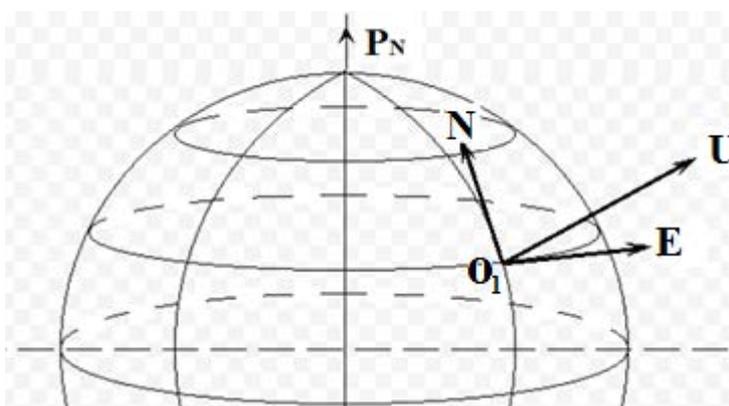


Рис. 1. Локальная геодезическая система координат

С учетом рассмотренных выше преобразований выражение для ГФ в системе координат  $O_1UNE$  можно записать в виде:

$$GDOP_{UNE} = \sqrt{M (GDOP^2) M^T}.$$

Для получения значений ГФ в заданной области воздушного пространства можно использовать информацию от сети наземных станций мониторинга ССН, полунатурное моделирование, например, с использованием современных программно-аппаратных комплексов [3], [4], а также методы, основанные на математическом моделировании орбитальной группировки ГЛОНАСС.

В последних двух случаях необходимо оценить адекватность моделирования.

### ОЦЕНКА АДЕКВАТНОСТИ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ОРБИТАЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ НС

Математическая модель орбитальной группировки ГЛОНАСС, используемая в данной работе, построена на основе данных, опубликованных в [5]. Входными данными модели орбитального движения является альманах ГЛОНАСС, получаемый с веб-сайта Информационно-аналитического центра ГЛОНАСС [6] и преобразуемый в нужный для работы модели формат.

Методика оценки адекватности разработанной модели основывается на сопоставлении ее выходных данных (номера НС, находящихся в зоне видимости, границы и продолжительность интервалов времени нахождения НС в зоне видимости, значения пространственного, горизонтального и вертикального ГФ) с данными, полученными при натурном эксперименте с приемни-

ком СН-4312, расположенным в точке с известными координатами, а также с данными, формируемыми средой создания сценариев имитатора спутниковых систем навигации СН-3803М. Кроме этого, дополнительно проводилось сопоставление выходных данных модели с данными Информационно-аналитического центра (ИАЦ) ГЛОНАСС.

На рис. 2 показаны графики изменения горизонтального  $HDOP$  (рис. 2,а) и вертикального  $VDOP$  (рис. 2,б) ГФ, полученные при проведении натурального эксперимента (кривые 1) и путем математического моделирования (кривые 2).

Натурный эксперимент проводился 26.02.2015 с использованием авиационного приемника СН-4312, антенна которого расположена в точке с координатами  $H = 503,18$  м,  $B = 52^{\circ}15'25,8''$ ,  $L = 104^{\circ}21'22,1''$  (г. Иркутск) на интервале времени с 05:00 до 11:00 UTC. Для этих же условий проводилось математическое моделирование.

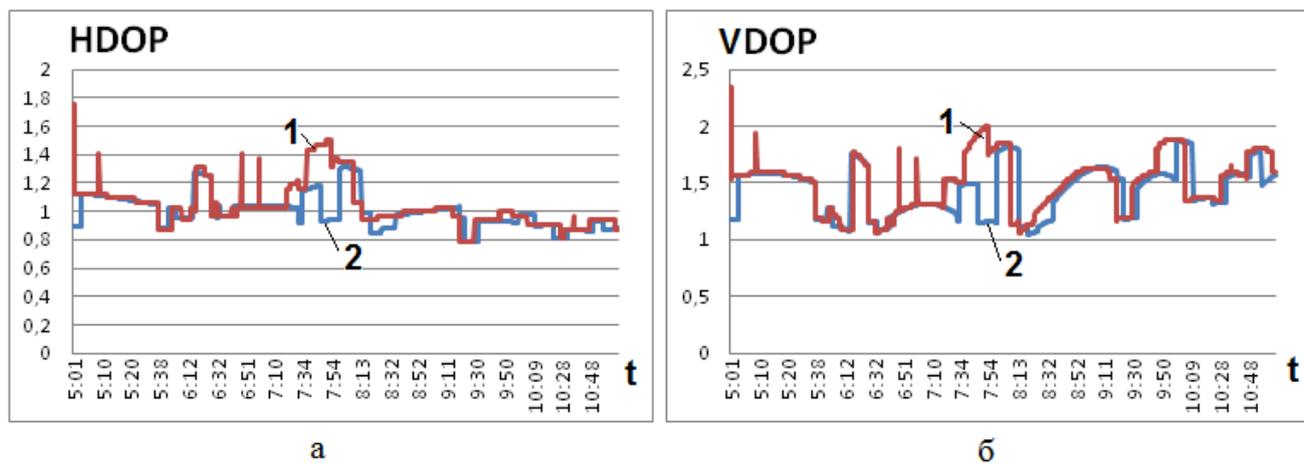


Рис. 2. Изменение ГФ на исследуемом интервале времени:  
а) горизонтальный ГФ; б) вертикальный ГФ

Проведенные эксперименты показали хорошее соответствие результатов натурального эксперимента и имитационного математического моделирования, что говорит об адекватности разработанной модели орбитальной группировки ГЛОНАСС. Некоторые отличия значений ГФ связаны с неустойчивым слежением приемника СН-4312 за сигналами НС в отдельные интервалы времени в процессе натурального эксперимента. Также обеспечивалось полное соответствие выходных данных разработанной модели с данными, формируемыми средой создания сценариев имитатора СН-3803М и данными ИАЦ ГЛОНАСС.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ГФ И ПОЛЕЙ ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ТОЧНОСТИ ГЛОНАСС

Проведенные эксперименты показали, что в ряде случаев на интервале наблюдения имеют место значительные вариации значений ГФ, в большей степени – вертикального  $VDOP$ . Следовательно, точность аэронавигационного обеспечения по данным ССН будет тоже изменяться в течение времени и в разных точках маршрута полета, что указывает на актуальность проблемы прогнозирования и построения полей точности ГЛОНАСС для заданных моментов или интервалов времени для заданных областей воздушного пространства с целью улучшения ситуационной осведомленности экипажей о качестве аэронавигационного обеспечения.

Эта же проблема актуальна для прогнозирования ожидаемой точности определения координат ВС при полете по заданному или выбираемому (концепции *RNAV*, *Free Flight*) маршруту в условиях, когда использование традиционных технологий организации и управления воздушным движением (ОрВД), а также технических средств ОрВД наземного базирования может быть либо малоэффективным, либо невозможным.

Предложенная методика построения рабочих зон ГЛОНАСС, была применена для области воздушного пространства от  $22,346^{\circ}$  до  $78^{\circ}$  с.ш. и от  $36^{\circ}$  до  $105,12^{\circ}$  в.д., включающей маршрут полета Иркутск - Москва. Исследуемая область разбивалась на 180 точек по широте (шаг  $0,309^{\circ}$ ) и 180 точек по долготе (шаг  $0,384^{\circ}$ ). В модели орбитального движения использовался альманах ГЛОНАСС по состоянию на 02.03.2015 г. Моделирование проводилось для интервала времени с 0:00 до 06:00 UTC, что примерно соответствует времени вылетов ВС из аэропорта Иркутск в Москву и продолжительности полета по маршруту.

На рис. 3 приведены результаты исследования динамики изменения горизонтального и вертикального ГФ в Иркутске, Москве и при полете ВС по маршруту Иркутск - Москва (моделировался полет на высоте 10000 м по прямолинейной траектории с постоянным курсом и путевой скоростью около 700 км/ч).

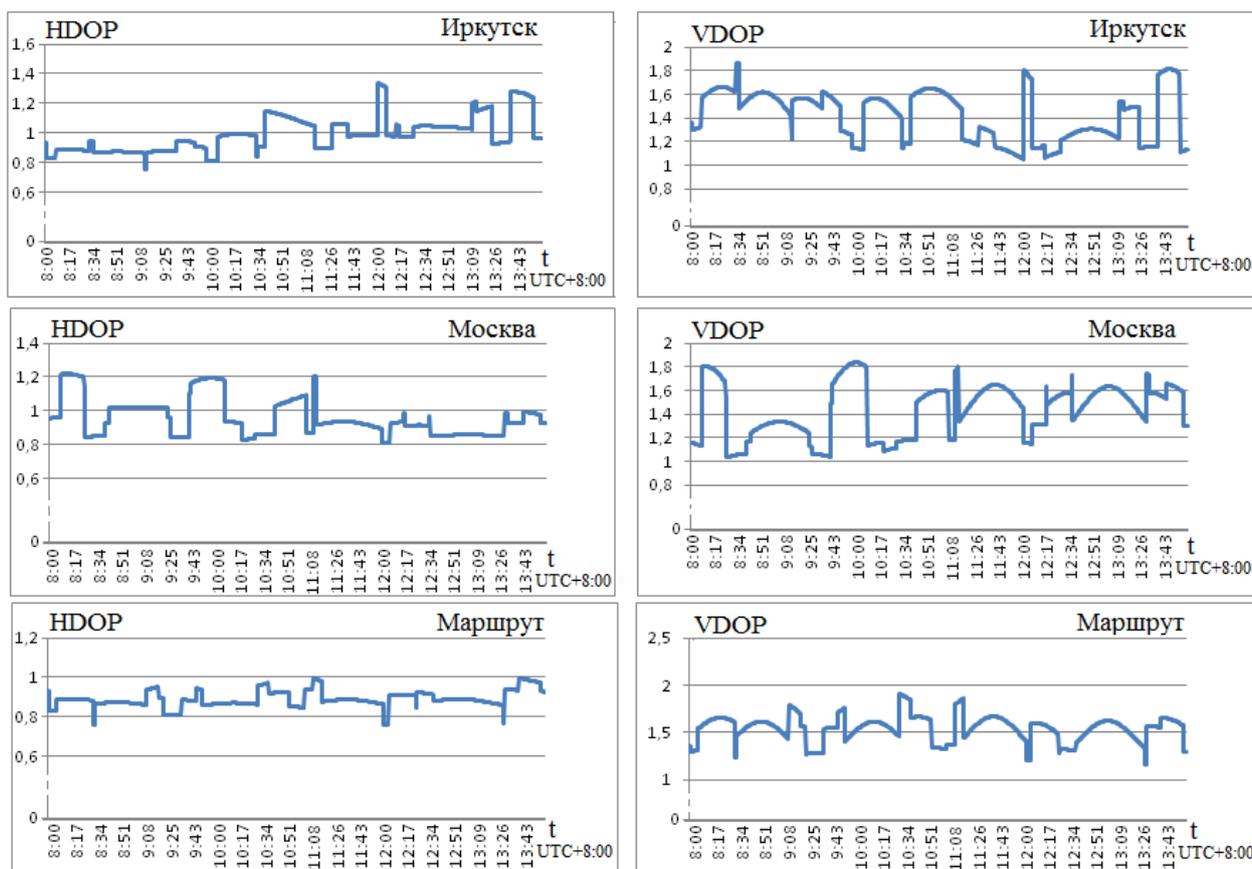


Рис. 3. Динамика изменения горизонтального и вертикального ГФ

Результаты статистической обработки полученных данных на интервале времени с 0:00 до 06.00 UTC приведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты обработки данных моделирования

Параметр	Иркутск	Москва	Маршрут
1	2	3	4
$HDOP_{\min}$	0,75	0,81	0,76
$HDOP_{\max}$	1,35	1,22	1,0
$HDOP_{\text{средн}}$	0,989	0,959	0,892
Среднеквадратичное отклонение $HDOP$	0,117	0,113	0,042

Продолжение табл. 1

1	2	3	4
$VDOP_{\min}$	1,02	1,01	1,2
$VDOP_{\max}$	1,87	1,82	1,9
$VDOP_{\text{средн}}$	1,423	1,438	1,548
Среднеквадратичное отклонение $VDOP$	0,213	0,228	0,137

Как следует из полученных результатов, на этапах взлета, посадки и по маршруту полета по значениям горизонтального и вертикального ГФ обеспечиваются достаточно хорошие условия навигационного сеанса. При этом в целом по маршруту горизонтальный ГФ близок к наилучшему, причем поля точности в горизонтальной и вертикальной плоскостях более однородны, чем в пунктах взлета и посадки.

На рис. 4,5 представлены полученные путем математического моделирования орбитального движения ГЛОНАСС и соответствующей обработки данных о значениях геометрических факторов в выбираемых точках поля точности для зоны пространства, включающей маршрут полета Иркутск - Москва для моментов времени 0:00 (рис.4) и 06:00 (рис.5) UTC на дату 02.03.2015 г. Для построения полей точности использовалась наиболее просто реализуемая равнопромежуточная цилиндрическая проекция с базисной точкой  $(\varphi_0, \lambda_0) = (0,0)$ . Следует отметить, что использование такой проекции приводит к искажениям размеров зон в верхней части рисунков.

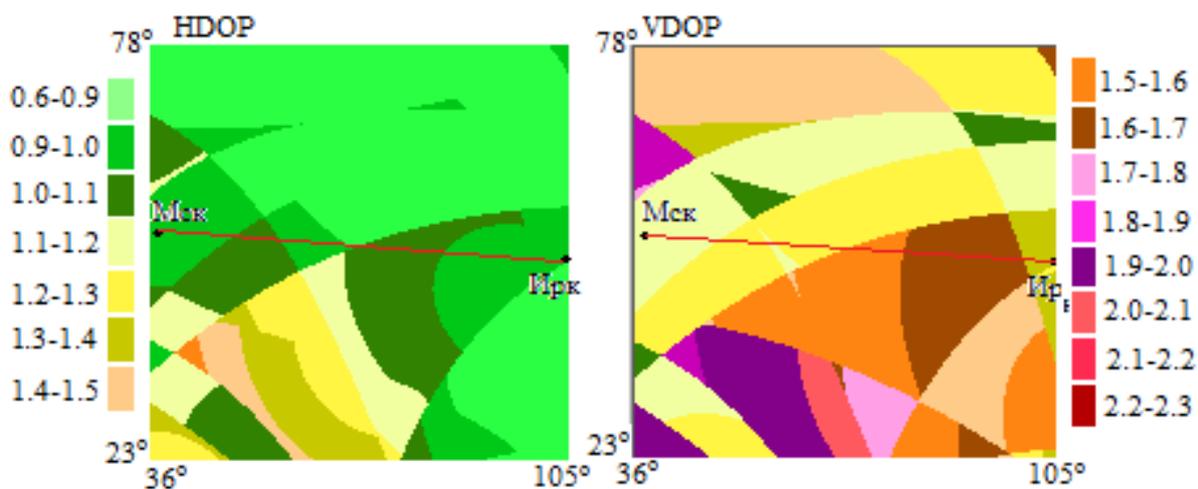


Рис. 4. Поля точности ГЛОНАСС в 0:00 UTC

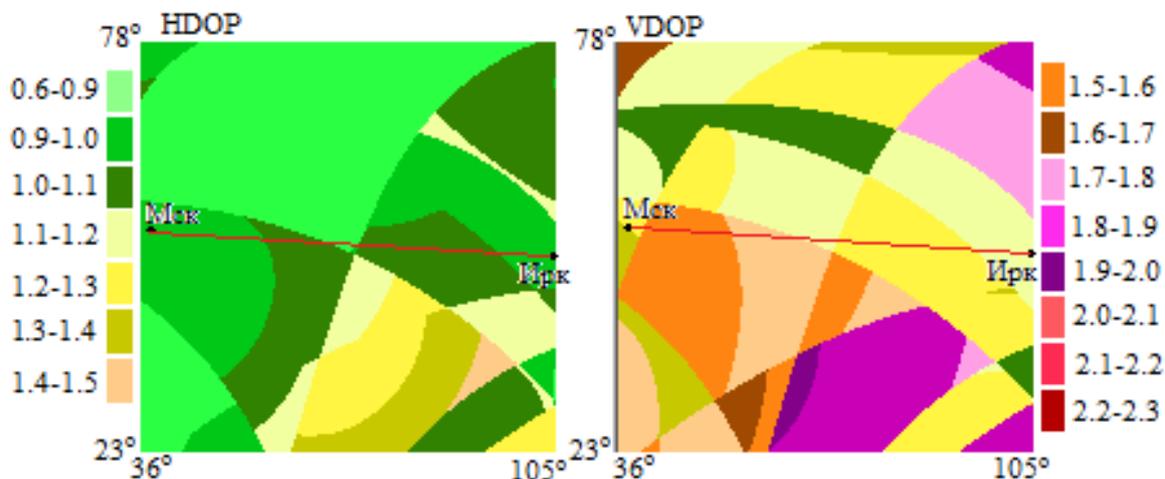


Рис. 5. Поля точности ГЛОНАСС в 06:00 UTC

Из полученных результатов следует, что поле точности ГЛОНАСС для рассмотренной зоны воздушного пространства и для данных моментов времени в горизонтальной плоскости является более однородным (*HDOP* изменяется в пределах 0.75-1.5) по сравнению с полем точности в вертикальной плоскости (*VDOP* изменяется в пределах 1.0-2.3).

При этом наблюдается ухудшение потенциальной (по условиям наблюдаемой группировки НС) точности ГЛОНАСС по мере приближения к экваториальной области.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе доказана адекватность разработанной в среде LabView модели орбитального движения спутников ГЛОНАСС. Предложенная на основе данной модели методика расчета и построения рабочих зон ГЛОНАСС может быть использована для прогнозирования потенциальной точности навигационных определений как в горизонтальной, так и в вертикальной плоскостях для выбираемых маршрутов полета, а также зон аэродромов. При этом модель построения рабочих зон ГЛОНАСС является гибкой, позволяя изменять размеры исследуемой области воздушного пространства, количество анализируемых точек внутри этой области, а также изменять задаваемые для определения границ рабочей зоны диапазоны изменения значений геометрических факторов.

Методика может использоваться при планировании полетов, а также в бортовых системах самолетовождения для улучшения ситуационной осведомленности экипажей ВС при выполнении полетов по технологиям *RNAV* и *Free Flight*.

## ЛИТЕРАТУРА

1. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования / под ред. А.И. Перова, В.Н. Харисова. Изд. 4-е, перераб. и доп. – М.: Радиотехника, 2010.
2. Антонович К.М. Использование спутниковых радионавигационных систем в геодезии. Монография. В 2-х т. Т. 1. - М.: ФГУП "Картгеоцентр", 2005.
3. Скрыпник О.Н., Нечаев Е.Е., Арефьев Р.О. Построение и анализ полей точности GPS на основе программно-аппаратных средств NI GPS SIMULATION TOOLKIT // Научный вестник МГТУ ГА. 2014. № 209. С. 5-12.
4. Нечаев Е.Е., Скрыпник О.Н. Методика построения рабочей зоны GPS на основе полунатурного моделирования. // Материалы 24-й Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». Севастополь. В 2-х т. Т. 1. 2014. С. 284-285.
5. ГЛОНАСС. Интерфейсный контрольный документ (ред. 5.1). – М: РНИИКИП, 2008.
6. Информационно-аналитический центр ГЛОНАСС, <http://glonass-iac.ru/>, 2005.

## TECHNIQUE OF CONSTRUCTION AND ANALYSIS OF GLONASS FIELDS OF ACCURACY IN THE GIVEN ZONE OF AIRSPACE

Skrypnik O.N., Arefev R.O., Astrakhanceva N.G.

Based on the usage of LabView's developed program of orbital motion modeling and the choice of satellite's working constellation, the methodology of building-up the fields of potential accuracy GLONASS in the given airspace has been proposed. The methods are based on the estimation of horizontal (*HDOP*) and vertical (*VDOP*) geometric factors' values in points chosen with given latitude and longitude discontinuity in the airspace which is being studied. By relevant error handling the areas where the values of *HDOP* and *VDOP* lay within given range and their cartographic matching are selected. Expressions for geometric factors calculation are listed. By comparing the data of real experiments with semirealistic simulation which have been conducted with the aeronautical receiver CH-4312 and the simulator CH-3803M, the validity of math model and the results' accuracy have been evaluated. Investigations of geometric factors' change in the ini-

tial and finishing points of flight route and also during the flight Irkutsk-Moscow have been conducted. As an example the fields of accuracy GLONASS in horizontal and vertical surfaces for the airspace between Irkutsk and Moscow have been built for such points in time that match the aircraft's take off in Irkutsk and its landing in Moscow.

**Key words:** GLONASS, geometric factor, mathematical model of the orbital movement, field of potential accuracy, navigation satellite, areal navigation, system of coordinates.

## REFERENCES

1. **Perov A.I., Harisova V.N.** GLONASS. Principy postroenija i funkcionirovanija (GLONASS. The principles of construction and operation), Moscow, Radiotekhnika, 2010, 796 p. (In Russian)
2. **Antonovich K.M.** Ispol'zovanie sputnikovyh radionavigacionnyh sistem v geodezii (The use of satellite navigation systems in geodesy), Moscow, Kartgeocentr, 2005, vol. 1, 334 p.
3. **Skrypnik O.N., Nechaev E.E., Aref'ev R.O.** Nauchnyj vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta grazhdanskoj aviacii, 2014, vol. 209, pp. 5-12. (In Russian)
4. **Nechaev E.E., Skrypnik O.N.** Materialy 24-j Mezhdunarodnoi Krymskoj konferentsii «SVCh-tehnika i telekommunikacionnye tehnologii», Sevastopol, 2014, vol. 1, pp. 284-285. (In Russian)
5. **GLONASS.** Interfejsnyj kontrol'nyj dokument (red. 5.1) (GLONASS. The interface control document (5 ed. 1)), Moscow, Joint-Stock Company "Institute of Space Device Engineering", 2008, 74 p. (In Russian)
6. Informacionno-analiticheskij centr GLONASS, <http://glonass-iac.ru/>.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**Скрыпник Олег Николаевич**, 1959 г.р., окончил Киевское ВВАИУ (1981), профессор, доктор технических наук, почетный работник высшего профессионального образования РФ, заместитель директора Иркутского филиала МГТУ ГА по учебно-научной работе, автор свыше 80 научных работ, область научных интересов – радионавигация, спутниковые системы навигации, межсамолетная навигация, комплексная обработка навигационной информации. E-mail: [skripnikon@yandex.ru](mailto:skripnikon@yandex.ru).

**Арефьев Роман Олегович**, 1991 г.р., окончил Иркутский филиал МГТУ ГА (2013), аспирант кафедры управления воздушным движением МГТУ ГА, автор 11 научных работ, область научных интересов – радионавигация, спутниковые системы навигации. E-mail: [seven7772009@ya.ru](mailto:seven7772009@ya.ru).

**Астраханцева Наталья Геннадьевна**, окончила Иркутский филиал МГТУ ГА (2013), аспирант кафедры управления воздушным движением МГТУ ГА, автор 10 научных работ, область научных интересов – радиосвязь, широкополосные системы связи, радионавигация, спутниковые системы навигации. E-mail: [n\\_astrahanceva\\_awesome@mail.ru](mailto:n_astrahanceva_awesome@mail.ru).