

УДК 621.396

## Способ определения доступности космических аппаратов спутниковых радионавигационных систем для мониторинга параметров ионосферы в интересах декаметровый радиосвязи

Коваль С. А., Сальников Д. В., Пашинцев В. П., Михайлов Д. А.

**Постановка задачи:** известно, что диагностику и прогнозирование условий распространения декаметровых радиоволн возможно осуществлять с применением трансionoсферного зондирования на основе приема сигналов спутниковых радионавигационных систем. При этом необходимо учитывать видимость навигационных космических аппаратов в требуемой зоне (области мониторинга ионосферы) в течение времени, достаточного для статистического накопления информации. Возникает необходимость численно определять доступность навигационных космических аппаратов для проведения мониторинга ионосферы, т.е. способность спутниковой радионавигационной системы на заданном интервале времени обеспечивать навигационную аппаратуру потребителя навигационным сигналом от видимых в требуемой зоне навигационных космических аппаратов. Численной мерой доступности навигационных космических аппаратов для проведения мониторинга ионосферы в заданной области определен процент времени (на некотором интервале), в течение которого в точке нахождения навигационной аппаратуры потребителя не менее одного навигационных космических аппаратов будет являться видимым и длительность измерения параметров ионосферы с видимых навигационных космических аппаратов будет не менее необходимой для проведения мониторинга ионосферы (достаточной для статистического накопления информации) в требуемой зоне. **Целью работы** является разработка способа определения доступности навигационных космических аппаратов спутниковых радионавигационных систем для прогнозирования условий распространения радиоволн на трассах декаметровый радиосвязи. **Новизна** заключается в разработке способа мониторинга ионосферы в интересах декаметровый радиосвязи с использованием результатов моделирования координат навигационных космических аппаратов спутниковой радионавигационной системы ГЛОНАСС и учетом взаимного расположения корреспондентов, даты и времени организации сеанса радиосвязи. **Результат:** разработан способ определения доступности навигационных космических аппаратов спутниковых радионавигационных систем для прогнозирования условий распространения радиоволн на произвольных трассах декаметровый радиосвязи с учетом координат корреспондентов. **Практическая значимость:** Разработанный способ определения доступности навигационных космических аппаратов для прогнозирования условий распространения радиоволн на трассах декаметровый радиосвязи позволяет определять возможность видимости навигационных космических аппаратов спутниковых радионавигационных систем в течение требуемого времени для мониторинга ионосферы в интересах организации декаметровый радиосвязи на произвольных трассах. Разработанный способ позволяет заранее планировать сеансы радиосвязи с обеспечением возможности мониторинга ионосферы.

**Ключевые слова:** декаметровый радиосвязь, ионосферный мониторинг, спутниковая радионавигационная система, орбитальное движение.

### Библиографическая ссылка на статью:

Коваль С. А., Сальников Д. В., Пашинцев В. П., Михайлов Д. А. Способ определения доступности космических аппаратов спутниковых радионавигационных систем для мониторинга параметров ионосферы в интересах декаметровый радиосвязи // Системы управления, связи и безопасности. 2022. № 3. С. 16-40. DOI: 10.24412/2410-9916-2022-3-16-40

### Reference for citation:

Koval S. A., Salnikov D. V., Pashintsev V. P., Mikhaylov D. A. Method for determining the availability of global positioning system for monitoring ionospheric parameters in the interests of decameter radio communication. *Systems of Control, Communication and Security*, 2022, no. 3, pp. 16-40 (in Russian). DOI: 10.24412/2410-9916-2022-3-16-40

## Введение

Декаметровая (ДКМ) радиосвязь – вид ионосферной связи, основанный на отражении радиоволн от ионосферы. В настоящее время ДКМ связь находит широкое применение за счет ряда преимуществ, таких как автономность, низкая стоимость передачи в пересчете на 1 Мбайт информации в сутки на расстояние до 1000 км, большая дальность радиосвязи [1].

Радиосвязь в ДКМ диапазоне основана на распространении радиоволн путем отражения их от ионосферы, что обуславливает проявление ряда ионосферных эффектов, негативно влияющих на организацию связи и её качество. Ионосфера не является статистически однородной средой и вариации (возмущения) её параметров (например, электронной концентрации в каждом из слоев) требуют учета при планировании ДКМ радиосвязи и назначении частот. Для их учета проводится прогнозирование различных видов [2]: долгосрочное (более 5 суток), краткосрочное (1-5 суток) и оперативное (12-24 ч). Однако стоит учесть, что время стационарности спокойной среднеширотной ионосферы порядка 1 ч, а для высокоширотной ионосферы – несколько минут [3].

Наиболее перспективным представляется осуществлять диагностику и прогнозирование условий распространения ДКМ радиоволн непосредственно по результатам мониторинга на сети трасс наклонного зондирования ионосферы [3], либо с применением трансionoсферного зондирования на основе приема сигналов спутниковых радионавигационных систем (СРНС) с помощью двухчастотных приемников [4-6].

Однако в последнем случае необходимо учитывать видимость навигационных космических аппаратов (НКА) СРНС в требуемой зоне (области мониторинга ионосферы) в течение определенного времени (достаточного для статистического накопления информации), поскольку есть основания полагать, что мониторинг ионосферы в данной области не может быть произведен в любой момент времени для конкретной радиотрассы. В данном случае видимыми в требуемой зоне будут считаться те НКА, углы возвышения (углы места)  $\delta$  которых находятся в диапазоне  $\delta \in [\delta_{\min}, \delta_{\max}]$  и азимутальные углы  $\alpha$  находятся в диапазоне  $\alpha \in [\alpha_{\min}, \alpha_{\max}]$ , ограничивающих требуемую зону (область мониторинга ионосферы).

Поэтому необходимо численно определять доступность НКА СРНС для проведения мониторинга ионосферы, т.е. способность СРНС на заданном интервале времени обеспечивать навигационную аппаратуру потребителя (НАП) навигационным сигналом от видимых НКА. При этом численной мерой доступности НКА СРНС для проведения мониторинга ионосферы в заданной области будем понимать процент времени (на некотором интервале), в течение которого в точке нахождения НАП не менее одного НКА СРНС будет являться видимым и длительность измерения параметров ионосферы с видимых НКА будет не менее необходимой для проведения мониторинга ионосферы (достаточной для статистического накопления информации) в требуемой зоне.

Целью статьи является разработка способа определения доступности НКА СРНС для прогнозирования условий распространения радиоволн на трассах декаметровый радиосвязи.

### Принцип мониторинга ионосферы в интересах декаметровый радиосвязи с использованием СРНС

Основной вклад в нестационарность ионосферы вносят флуктуации электронной концентрации (ЭК)  $\Delta N$ , которые возникают из-за различных факторов (солнечное излучение, инжекция легкоионизирующихся веществ, радионагрев) и распределены неоднородно по пространству, образуя неоднородности ЭК ионосферы [2, 4, 7-10]. Наиболее существенное влияние на условия распространения радиоволн оказывают мелкомасштабные (10...1000 м) неоднородности ионосферы [4, 8].

Величина флуктуаций ЭК ( $\Delta N$ ) в мелкомасштабных неоднородностях ионосферы возрастает с ростом высоты пропорционально среднему (фоновому) значению ЭК ( $\bar{N}$ ). Поэтому отношение среднеквадратического отклонения (СКО) флуктуаций ЭК  $\sigma_{\Delta N} = \left(\overline{\Delta N^2}\right)^{0.5}$  к среднему значению ЭК на любой высоте ( $h$ ) ионосферы примерно постоянно [9, 10], т.е.  $\sigma_{\Delta N}(h) / \bar{N}(h) = \sigma_{\Delta N} / \bar{N} \approx const$ . Это отношение также называют интенсивностью неоднородностей ионосферы  $\beta_n = \sigma_{\Delta N} / \bar{N}$  [9]. В нормальной (невозмущенной) ионосфере интенсивность мелкомасштабных неоднородностей составляет  $\beta_n = (3...5) \cdot 10^{-3}$  [7] и увеличивается при возмущениях ионосферы типа ее диффузности. Увеличение интенсивности неоднородностей ионосферы  $\beta_n$  приводит к ухудшению качества ДКМ радиосвязи по причине возникновения замираний принимаемых сигналов различного типа (общих, частотно-селективных и пространственно-селективных). При этом в ряде источников [11, 12] показано, что с ростом интенсивности неоднородностей  $\beta_n$  уменьшается параметр райсовских замираний  $\gamma^2 \sim 1/\beta_n$  принимаемых сигналов в ДКМ канале, сужаются интервалы частотной  $F_k \sim 1/\beta_n$  и пространственной корреляции  $\Delta r_k \sim 1/\beta_n$  замираний. Соответственно, по изменению интенсивности мелкомасштабных неоднородностей  $\beta_n$  в области отражения радиоволны можно судить об уровне диффузности ионосферы и изменении параметров замираний в конкретном ДКМ радиоканале.

Известны [13] способы определения интенсивности мелкомасштабных неоднородностей  $\beta_n$  ионосферы по результатам приема и обработки сигнала, излученного НКА СРНС на двух несущих частотах ( $f_1, f_2$ ). Основу этих способов составляет известный [4] метод определения полного электронного содержания (ПЭС) ионосферы двухчастотным радионавигационным приемником в соответствии с выражением

$$N_T = \frac{1}{40,4} \cdot \frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} (L_1 \lambda_1 - L_2 \lambda_2), \quad \text{эл/м}^{-2}, \quad (1)$$

где 40,4 – коэффициент, имеющий размерность  $[м^3/с^2]$ ,  $L_1, L_2$  – число оборотов фазы сигналов;  $\lambda_1 = c/f_1, \lambda_2 = c/f_2$  – длины волн  $[м]$ ;  $c$  – скорость света в вакууме.

Здесь исходными данными для расчета ПЭС ионосферы ( $N_T$ ) согласно (1) являются значения числа оборотов фазы ( $L_1$  и  $L_2$ ) на частотах СРНС ( $f_1, f_2$ ), которые зависят от состояния ионосферы. Произведение  $L_{1(2)}\lambda_{1(2)}$  в формуле (1) соответствуют фазовому пути  $R_{\phi 1(2)}$  распространения радиоволны в ионосфере (или псевдодальности, измеренной по фазе) на частотах НКА ( $f_1, f_2$ ):

$$L_{1(2)} \cdot \lambda_{1(2)} = R_{\phi 1(2)} = R - \frac{40,4 N_T}{f_{1(2)}^2}, \text{ м}, \quad (2)$$

где  $R$  – истинная дальность от НКА до приемника.

По результатам измерений фазовых путей  $R_{\phi 1(2)}$  в двухчастотном приемнике СРНС можно рассчитать ПЭС ионосферы (1) по формуле:

$$N_T = \frac{f_1^2 f_2^2}{40,4(f_1^2 - f_2^2)} (R_{\phi 1} - R_{\phi 2}). \quad (1a)$$

Таким образом, согласно (2) и (1a) формирование в двухчастотном приемнике СРНС разности псевдодальностей (фазовых путей), измеренных на двух частотах, фактически эквивалентно определению ПЭС ионосферы на заданной трассе распространения радиоволн.

Отметим, что изменение ЭК в ионосфере по высоте ( $h$ ) и горизонтальным координатам ( $\rho = (x, y)$ ) можно описать совокупностью

$$N(h, x, y) = N(h, \rho) = \overline{N(h)} + \Delta N(h, \rho)$$

изменения по высоте ее среднего значения  $\overline{N(h)}$ , описывающего регулярные изменения ЭК в слоях ионосферы (D, E, F) и ее среднемасштабных ( $10^3 \dots 10^4$  м) и крупномасштабных ( $10^5 \dots 10^6$  м) неоднородностях, и пространственных флуктуаций ЭК в мелкомасштабных неоднородностях  $\Delta N(h, \rho)$ . Поэтому ПЭС ионосферы на трассе от НКА, размещенного на высоте  $h_{\text{НКА}}$ , до наземного приемника СРНС также будет описываться совокупностью его среднего значения и мелкомасштабных флуктуаций ПЭС [13]:

$$N_T(\rho) = \int_0^{h_{\text{НКА}}} N(h, \rho) dh = \int_0^{h_{\text{НКА}}} \overline{N(h)} dh + \int_0^{h_{\text{НКА}}} \Delta N(h, \rho) dh = \overline{N_T} + \Delta N_T(\rho). \quad (3)$$

В (3) среднее значение ПЭС ионосферы можно выразить как произведение

$$\overline{N_T} = \int_0^{h_{\text{НКА}}} \overline{N(h)} dh = \overline{N(h_m)} \cdot h_3 = \overline{N_m} \cdot h_3, \quad (4)$$

где  $h_3 \ll h_{\text{НКА}}$  – эквивалентная толщина однородной ионосферы со средней ЭК, соответствующей ее среднему значению  $\overline{N_m} = \overline{N(h_m)}$  на высоте  $h = h_m$  максимума ионизации в слое F ионосферы.

Мелкомасштабные флуктуации ПЭС ионосферы  $\Delta N_T(\rho)$  характеризуются их СКО, которое описывается выражением вида [10]

$$\sigma_{\Delta N_T} = \left( \overline{\Delta N_T^2(\rho)} \right)^{0,5} = \beta_{и} \overline{N_m} (\sqrt{\pi} l_s h_3)^{0,5}, \quad (5)$$

где  $l_s$  – характерный (средний) размер мелкомасштабных ионосферных неоднородностей ( $\sim 200$  м).

Поскольку согласно (4)  $\overline{N_m} = \overline{N_T} / h_3$ , из (5) получаем выражение для оценки интенсивности мелкомасштабных ионосферных неоднородностей в следующем виде [13]:

$$\beta_{и} = \frac{\sigma_{\Delta N_T}}{\overline{N_m} (\sqrt{\pi} l_s h_3)^{0,5}} = \frac{\sigma_{\Delta N_T}}{\overline{N_T}} \left( \frac{h_3}{\sqrt{\pi} l_s} \right)^{0,5}. \quad (6)$$

Практическая значимость полученного результата (6) обусловлена тем, что в настоящее время оценка интенсивности мелкомасштабных ионосферных неоднородностей осуществляется с помощью станции вертикального ионосферного зондирования по величине «диффузного размытия» высотно-частотной характеристики на высоте  $h = h_m$  максимума ионизации относительно ее среднего значения, которая соответствует отношению  $\beta_{и} = \sigma_{\Delta N}(h_m) / \overline{N}(h_m)$  величины СКО мелкомасштабных флуктуаций ЭК  $\Delta N(h_m)$  к ее среднему значению  $\overline{N}(h_m)$  на высоте  $h = h_m$  максимума ионизации [14]. Полученная формула (6) указывает на возможность оценки интенсивности ионосферных неоднородностей более простым способом с помощью определения на выходе двухчастотного приемника СРНС мелкомасштабных флуктуаций ПЭС ионосферы (3)  $\Delta N_T(\rho)$  и последующего расчета их статистических характеристик (среднего значения  $\overline{N_T}$  и СКО  $\sigma_{\Delta N_T}$ ) для определения отношения (6)  $\beta_{и} \sim \sigma_{\Delta N_T} / \overline{N_T}$ .

В общем случае наклонного распространения волны от НКА до наземного приемника СРНС под углом  $\delta \geq 15^\circ$  к горизонту ПЭС ионосферы будет больше вертикального ПЭС (3) в  $\text{cosec } \delta$  раз:

$$\begin{aligned} N_T(\rho, \delta) &= \int_0^{h_{\text{НКА}}} N(h, \rho) dl \approx \text{cosec } \delta \int_0^{h_{\text{НКА}}} N(h, \rho) dh = \\ &= \overline{N_T} \text{cosec } \delta + \Delta N_T(\rho) \text{cosec } \delta = \overline{N_T}(\delta) + \Delta N_T(\rho, \delta), \end{aligned} \quad (3a)$$

где  $dl \approx dh \cdot \text{cosec } \delta$  – элемент пути вдоль наклонной траектории распространения волны.

В соответствии с (3a) среднее значение и СКО ПЭС при наклонном ( $\delta \geq 15^\circ$ ) распространении волны будут определяться аналогично (4, 5) при замене при замене  $h_3$  на увеличенное значение  $h_3 \cdot \text{cosec } \delta$  как

$$\overline{N_T}(\delta) = \overline{N_m} \cdot h_3 \text{cosec } \delta = \overline{N_T} \text{cosec } \delta; \quad (4a)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{\Delta N_T}(\delta) &= \beta_{\text{и}} \overline{N_m} (\sqrt{\pi} l_s h_3 \operatorname{cosec} \delta)^{0.5} = \sigma_{\Delta N_T} (\operatorname{cosec} \delta)^{0.5} = \\ &= \beta_{\text{и}} \overline{N_T}(\delta) (\sqrt{\pi} l_s / h_3 \operatorname{cosec} \delta)^{0.5}. \end{aligned} \quad (5a)$$

В соответствии с (5a) интенсивность мелкомасштабных неоднородностей ионосферных при наклонном распространении радиоволн через ионосферу под углом  $\delta \geq 15^\circ$  определяется как

$$\beta_{\text{и}}(\delta) = \frac{\sigma_{\Delta N_T}(\delta)}{\overline{N_T}(\delta)} \left( \frac{h_3 \operatorname{cosec} \delta}{\sqrt{\pi} l_s} \right)^{0.5}. \quad (6a)$$

В частном случае вертикальной ( $\delta = 90^\circ$ ) трассы распространения волны от НКА до приемника СРНС значение  $\operatorname{cosec} \delta = 1$  и выражения (3a-6a) сводятся к виду (3-6).

Следует заметить, что в результате подстановки в (6a) выражений (4a) и (5a) для среднего значения  $\overline{N_T}(\delta)$  и СКО  $\sigma_{\Delta N_T}(\delta)$  ПЭС при наклонном распространении волны получаем формулу (6) для оценки интенсивности ионосферных неоднородностей при вертикальном распространении:

$$\beta_{\text{и}}(\delta) = \frac{\sigma_{\Delta N_T}(\operatorname{cosec} \delta)^{0.5}}{\overline{N_T} \operatorname{cosec} \delta} \left( \frac{h_3 \operatorname{cosec} \delta}{\sqrt{\pi} l_s} \right)^{0.5} \equiv \beta_{\text{и}} = \frac{\sigma_{\Delta N_T}}{\overline{N_T}} \left( \frac{h_3}{\sqrt{\pi} l_s} \right)^{0.5}. \quad (6b)$$

Отсюда следует, что выражение (6a) позволяет произвести оценку интенсивности ионосферных неоднородностей  $\beta_{\text{и}} = \sigma_{\Delta N}(h_m) / \overline{N}(h_m)$  на высоте максимума ионизации слоя F ( $h_m = 300 \dots 400$  км) на основе определения отношения  $\sigma_{\Delta N_T} / \overline{N_T}$  не при вертикальном (6), а при наклонном распространении радиоволн через ионосферу из одной точки в радиусе примерно 1000 км от места размещения двухчастотного приемника СРНС.

В соответствии с выражением (3a) для ПЭС ионосферы на трассе от НКА до двухчастотного приемника СРНС на выходе этого приемника формируется временной ( $t$ ) ряд

$$N_T(t, \delta) = \overline{N_T} \operatorname{cosec} \delta + \Delta N_T(t) \operatorname{cosec} \delta = \overline{N_T}(\delta) + \Delta N_T(t, \delta). \quad (3b)$$

После накопления статистического массива измерений ПЭС  $N_T(t, \delta)$  в течение необходимого для обеспечения требуемой точности отрезка времени ( $\Delta t$ ) возможно определение на выходе приемника СРНС среднего значения ПЭС  $\overline{N_T}(\delta)$  и СКО мелкомасштабных флуктуаций ПЭС ионосферы

$$\sigma_{\Delta N_T} = \left( \overline{(\Delta N_T(t, \delta))^2} \right)^{0.5}.$$

Расчет показал, что определение среднего значения ПЭС  $\overline{N_T}$  и СКО мелкомасштабных флуктуаций ПЭС  $\sigma_{\Delta N_T}$  с погрешностью, не превышающей 3 % будет возможным при накоплении около 1000 измерений мгновенных значений величины  $N_T$  в соответствии с (1a). Современные двухчастотные приемники сигналов СРНС типа GPStation-6, предназначенные для мониторинга ионо-

сферных сцинтилляций и ПЭС неоднородной ионосферы, осуществляют измерение ПЭС с частотой 1 Гц [6]. Поэтому время определения интенсивности неоднородностей ионосферы в произвольной области составляет 1000 с (16,6 мин). Анализ путей уменьшения этого времени показывает, что в приемнике GPStation-6 имеются возможности увеличения частоты измерений ПЭС до 50 Гц (т.е. уменьшения интервала дискретизации измерений с 1 с до 0,02 с) [15]. Таким образом, время определения интенсивности мелкомасштабных неоднородностей в произвольной области ионосферы можно сократить до 20 с.

Стоит также отметить, что ионосфера обладает примерно одинаковыми параметрами в радиусе  $\Delta D \approx 500$  км от предполагаемой точки отражения радиоволн [8, 9]. Тогда для оценки интенсивности неоднородностей ионосферы необходимо учитывать только лишь сигналы, прошедшие через область однородной по отношению к точке отражения ионосферы.

Схематично процесс мониторинга параметров ионосферы с помощью двухчастотного (ДЧ) приемника (ПРМ) СРНС в интересах ДКМ связи представлен на рис. 1.

При организации декаметровый радиосвязи на радиолинии произвольной протяженности  $R$  радиоволна, излученная передатчиком (ПРД), отражается на высоте  $h_{от}$  на расстоянии  $R/2$  между передатчиком и приемником (ПРМ). Существенный вклад в процесс распространения радиоволн будет вносить область, радиусом  $\Delta D$  вблизи точки отражения (показана штрих-пунктиром). Следовательно, эта область и представляет практический интерес с точки зрения мониторинга параметров ионосферы.

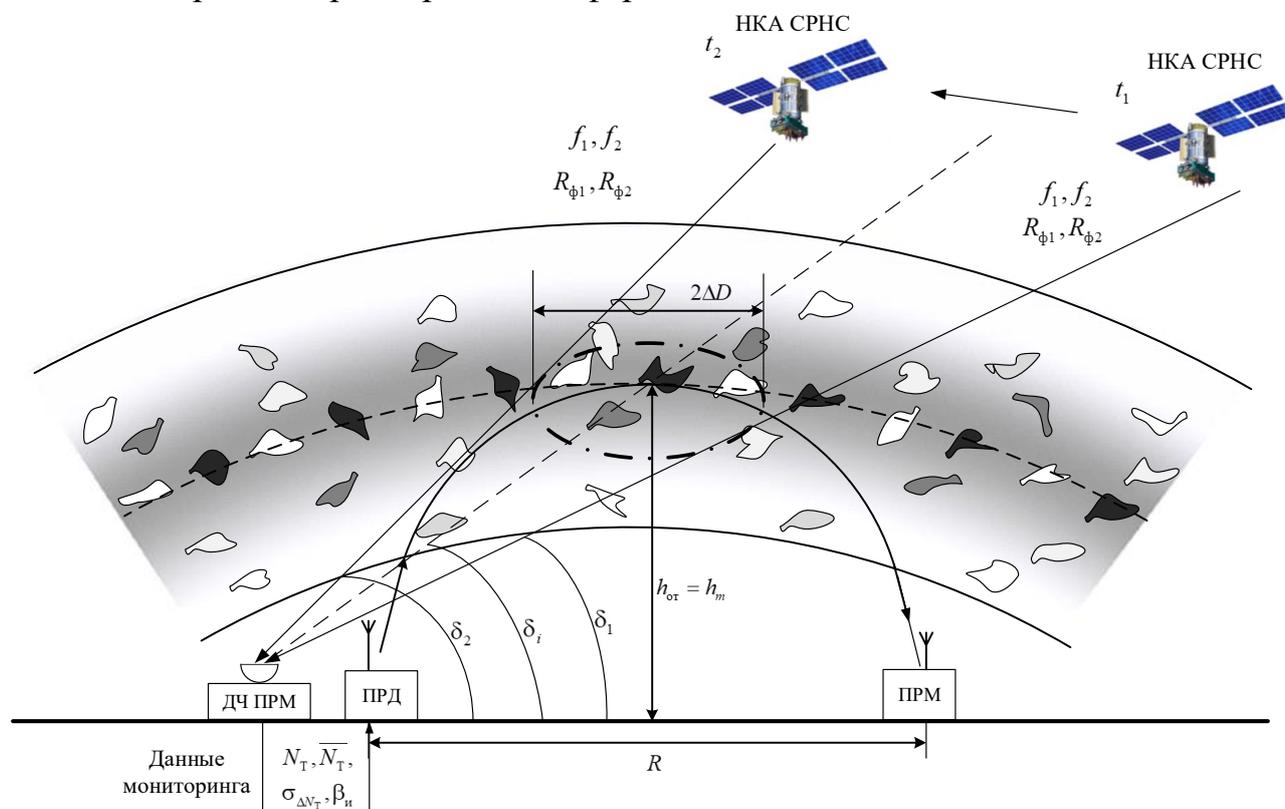


Рис. 1. Процесс мониторинга параметров ионосферы с помощью СРНС в интересах ДКМ связи

Таким образом, следует определить те НКА СРНС, сигналы от которых будут проходить через данную область и будут приниматься двухчастотным приемником (ДЧ ПРМ) сигналов СРНС, расположенным в непосредственной близости от одного из корреспондентов организуемой радиолинии. Сигналы только от этих НКА СРНС позволят в соответствии с выражениями (1-6б) определить ПЭС ( $N_T$ ) ионосферы, рассчитать его статистические характеристики ( $\overline{N_T}$ ,  $\sigma_{\Delta N_T}$ ) и оценить степень диффузности (возмущения ионосферы) по значению интенсивности неоднородностей ионосферы  $\beta_n$ .

### Математическое обоснование видимости НКА СРНС

#### для мониторинга параметров ионосферы в точке отражения

Для фильтрации НКА СРНС, используемых для мониторинга параметров ионосферы в точке отражения требуется задание некоторого сектора обзора, ограничивающего приход сигналов от НКА СРНС по азимутам и по углу места.

Исходными данными для расчета данного сектора являются: протяженность трассы  $R$ ; высота максимума ионизации слоя F ионосферы в точке отражения  $h_m$ ; радиус области мониторинга ионосферы  $\Delta D$  и координаты корреспондентов.

Определение границ видимости НКА СРНС по углам места производится в соответствии с рис. 2.

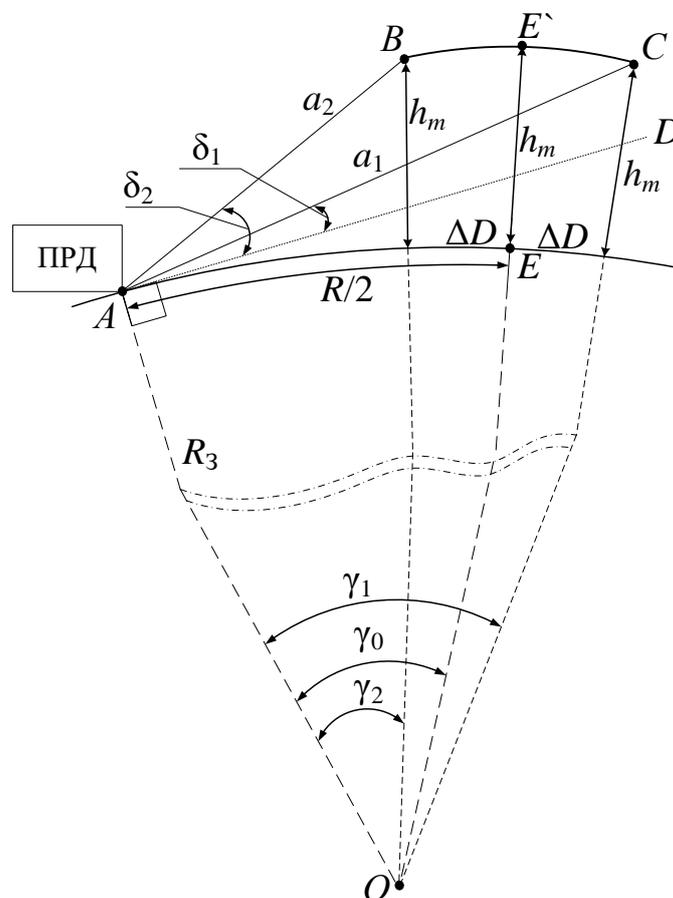


Рис. 2. К определению углов места зоны обзора

На рис. 2 обозначено:  $A$  – местоположение одного из корреспондентов, дуга  $BC$  – область мониторинга вдоль трассы (часть слоя F ионосферы на высоте максимума ионизации  $h_m$ ), луч  $AD$  – часть касательной к поверхности Земли в точке местонахождения корреспондента (нулевой угол места),  $O$  – центр масс Земли,  $OA$  – радиус Земли ( $R_3 = 6378$  км),  $AB = a_2$ ,  $AC = a_1$ , дуга  $AE = 0,5R$  – расстояние по поверхности Земли до перпендикуляра к точке отражения  $E$ , равное половине протяженности трассы,  $\angle CAD = \delta_1$ ,  $\angle BAD = \delta_2$ ,  $\angle AOE = \gamma_0$ ,  $\angle AOC = \gamma_1$ ,  $\angle AOB = \gamma_2$ , так, что  $\delta_1, \delta_2, \gamma_0, \gamma_1, \gamma_2$  лежат в одной плоскости.

Нижней границей угла места сектора обзора будет являться  $\angle CAD = \delta_1$ , верхней –  $\angle BAD = \delta_2$ . Значения этих углов находятся путем решения тригонометрической задачи нахождения  $\angle CAO$  и  $\angle BAO$  из треугольников  $AOC$  и  $AOB$  соответственно.

Тогда получим, что

$$\delta_1 = \arcsin \left( \frac{(R_3 + h_m)^2 - a_1^2 - R_3^2}{2a_1R_3} \right), \text{ рад,} \quad (7)$$

где

$$a_1 = \sqrt{R_3^2 + (R_3 + h_m)^2 - 2R_3(R_3 + h_m) \cdot \cos \left( \frac{0,5R + \Delta D}{R_3} \right)}, \quad (8)$$

$$\delta_2 = \arcsin \left( \frac{(R_3 + h_m)^2 - a_2^2 - R_3^2}{2a_2R_3} \right), \text{ рад,} \quad (9)$$

где

$$a_2 = \sqrt{R_3^2 + (R_3 + h_m)^2 - 2R_3(R_3 + h_m) \cdot \cos \left( \frac{0,5R - \Delta D}{R_3} \right)}. \quad (10)$$

Определение границ видимости НКА СРНС по азимутам производится в соответствии с рис. 3. На рисунке обозначено:  $A$  – местоположение одного из корреспондентов,  $GF$  – область мониторинга поперек трассы (часть слоя F ионосферы на высоте максимума ионизации  $h_m$ ), луч  $AE$  – пеленг на корреспондента (под углом  $\alpha$  относительно направления на север  $N$ ),  $a_0$  – расстояние от корреспондента до точки отражения волны от ионосферы,  $\angle FAE' = \angle GAE' = \Delta\alpha$  – половина сектора обзора по азимуту относительно пеленга на корреспондента.

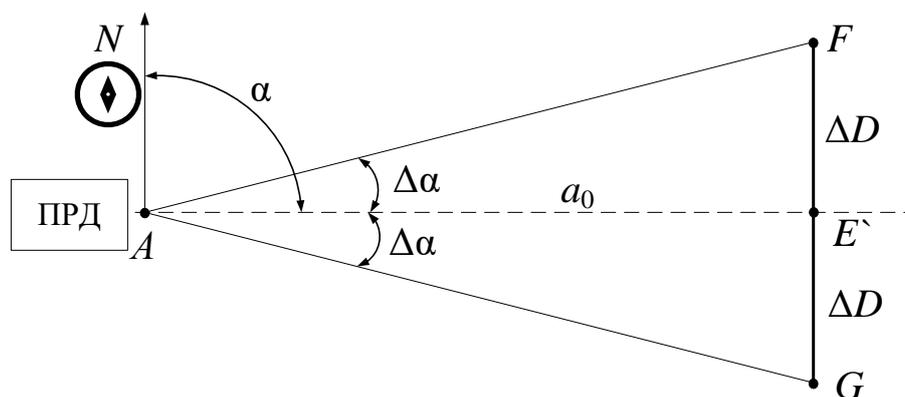


Рис. 3. К определению азимутов зоны обзора

Таким образом, границами обзора по азимуту будут являться углы  $\alpha_1 = \angle NAF = \alpha - \Delta\alpha$  и  $\alpha_2 = \angle NAG = \alpha + \Delta\alpha$  с учетом, что

$$\Delta\alpha = \arctan\left(\frac{\Delta D}{a_0}\right), \text{ рад}, \quad (11)$$

где

$$a_0 = \sqrt{R_3^2 + (R_3 + h_m)^2 - 2R_3(R_3 + h_m) \cdot \cos\left(\frac{0,5R}{R_3}\right)}. \quad (12)$$

Для обеспечения мониторинга ионосферы требуется наблюдение НКА СРНС в границах между углами  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  по азимуту и между углами  $\delta_1$  и  $\delta_2$  по углу места в течение заданного времени.

### Моделирование положения космических аппаратов группировки ГЛОНАСС в заданные промежутки времени

Достижение поставленной в статье цели (разработки способа определения доступности НКА для прогнозирования условий распространения радиоволн на трассах декаметровый радиосвязи) подразумевает моделирование (расчет) координат НКА СРНС.

При моделировании орбитального движения НКА СРНС ГЛОНАСС использовалась математическая модель, представленная в [16], учитывающая отклонение Земного поля тяготения от сферического, как наиболее значимого возмущения приводящему к отклонениям орбиты спутника от расчетной Кеплеровой. На основе математической модели орбитального движения НКА СРНС ГЛОНАСС разработан алгоритм (рис. 4), который лег в основу программы моделирующей орбитальное движение НКА СРНС ГЛОНАСС [17]. Расчет координат и составляющих вектора скорости НКА системы ГЛОНАСС производится в геоцентрической инерциальной (ECI – Earth-Centered Inertial) и фиксированной (ECEF – Earth-Centered, Earth-Fixed) [18] системах координат по данным альманаха [19] на интересующую дату (даты) и интервал московского декретного времени (МСК) с необходимым шагом дискретизации.



Рис. 4. Блок-схема алгоритма моделирования орбитального движения НКА СРНС ГЛОНАСС

Определение видимых НКА (проверки условия наблюдения НКА), когда угол его возвышения (угол места) из точки наблюдения относительно плоскости местного горизонта превышает минимально допустимое значение или равен ему [20] авторами решено проводить в топоцентрической системе координат (ТЦСК) [21] в которой ось  $O_{\text{тц}} X_{\text{тц}}$  ориентирована на север (*North*), ось

$O_{\text{тц}} Y_{\text{тц}}$  – на восток (*East*), а ось  $O_{\text{тц}} Z_{\text{тц}}$  – вверх (*Up*) (рис. 5). Такую топоцентрическую систему координат  $O_{\text{тц}} X_{\text{тц}}(N) Y_{\text{тц}}(E) Z_{\text{тц}}(U)$  сокращенно будем называть *NEU*.

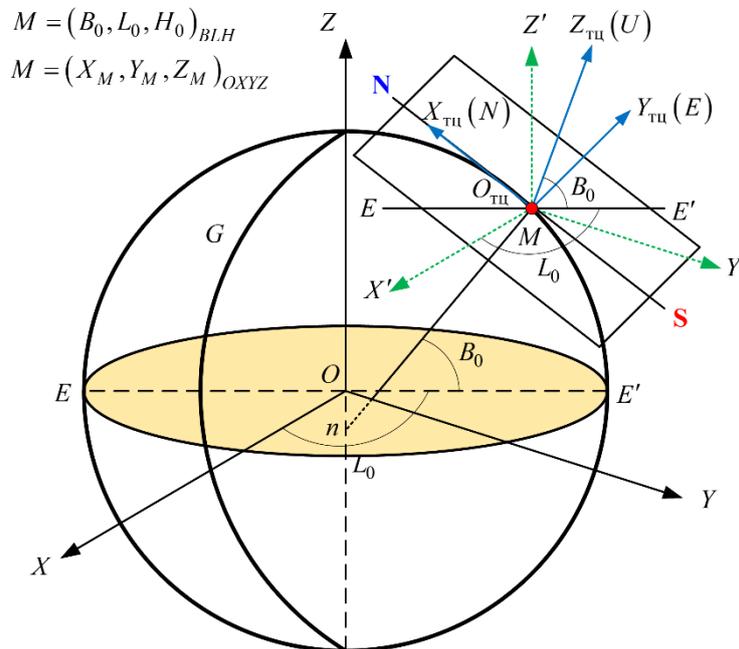


Рис. 5. Топоцентрическая система координат север-восток-вверх (NEU)

Топоцентрической системой координат называют систему, начало которой находится в какой-либо точке  $M$  поверхности Земли или околоземного пространства. При этом начало системы координат  $O_{\text{тц}}$  определяется в точке  $M$ . Плоскость  $X_{\text{тц}} O_{\text{тц}} Y_{\text{тц}}$  является касательной плоскостью к Земному эллипсоиду и называется местным горизонтом в точке  $M$ , ось  $O_{\text{тц}} Z_{\text{тц}}$  перпендикулярна плоскости  $X_{\text{тц}} O_{\text{тц}} Y_{\text{тц}}$ .

Процедура преобразования координат геоцентрической фиксированной (*ECEF*) системы координат  $OXYZ$  в координаты системы *NEU* следующая  $OXYZ \rightarrow O_{\text{тц}} X'Y'Z' \rightarrow SEU \rightarrow NEU$  см. рис. 5. С учетом вышеизложенного математическое преобразование координат  $OXYZ \rightarrow NEU$  производится согласно выражениям [22]:

$$\begin{aligned} X_{\text{тц}}(N) &= -(X - X_M) \sin B_0 \cos L_0 - (Y - Y_M) \sin B_0 \sin L_0 + (Z - Z_M) \cos B_0; \\ Y_{\text{тц}}(E) &= -(X - X_M) \sin L_0 + (Y - Y_M) \cos L_0; \\ Z_{\text{тц}}(U) &= (X - X_M) \cos B_0 \cos L_0 + (Y - Y_M) \cos B_0 \sin L_0 + (Z - Z_M) \sin B_0, \end{aligned} \quad (13)$$

где  $X, Y, Z$  – координаты системы координат  $OXYZ$ ,  $X_M, Y_M, Z_M$  – координаты точки  $M = O_{\text{тц}}$  снятые в  $OXYZ$ ,  $B_0, L_0$  – геодезические координаты (рис. 5) точки  $M = (B_0, L_0, H_0)_{BLH}$ .

Определение угла места (видимости) и азимутального направления на НКА производится при размещении наблюдателя в точке  $M = O_{\text{тц}}$  ТЦСК  $NEU$  на основе координат НКА, рассчитанных программой [17].

Угол места определяется из  $\Delta MIR$  (рис. 6), как

$$\delta_{\text{КА}} = \arccos(RM/MI), \quad (14)$$

где длины отрезков  $MI$  и  $RM$  вычисляются через координаты своих граничных точек. Если значение координаты  $Z_{\text{тц}}(U)$  НКА меньше значения координаты  $Z_{\text{тц}}(U)$  точки наблюдения  $M$ , то

$$\delta_{\text{КА}} = -\arccos(RM/MI). \quad (15)$$

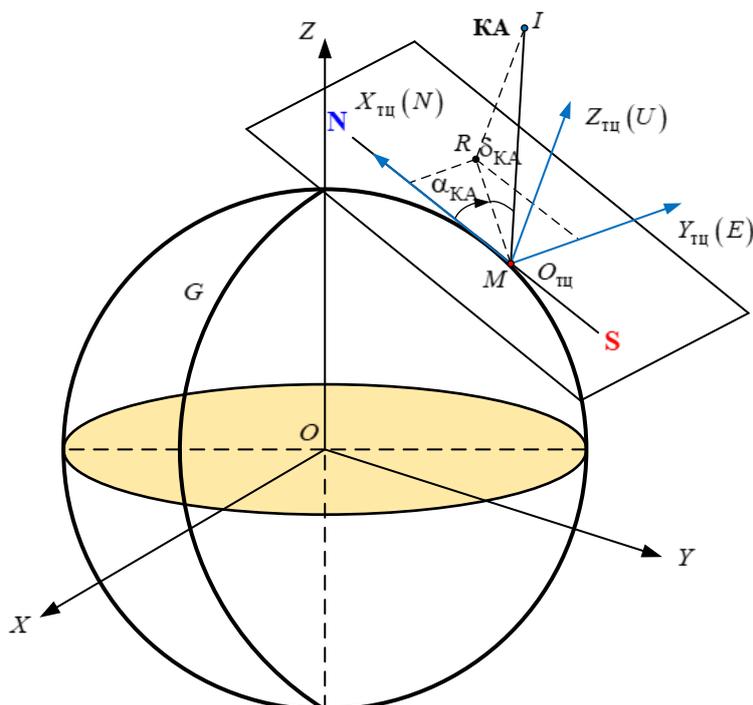


Рис. 6. К вопросу определения углов возвышения и азимута на НКА

Азимут на НКА определяется по одной из формул исходя из расположения проекции точки НКА на координатную плоскость  $X_{\text{тц}}(N)O_{\text{тц}}Y_{\text{тц}}(E)$ :

$$\alpha_{\text{КА}} = \arccos(R_x M / RM) \quad (16)$$

– для I координатной четверти;

$$\alpha_{\text{КА}} = 90^\circ + \arccos(R_y M / RM) \quad (17)$$

– для IV координатной четверти;

$$\alpha_{\text{КА}} = 180^\circ + \arccos(R_{-x} M / RM) \quad (18)$$

– для III координатной четверти;

$$\alpha_{\text{КА}} = 270^\circ + \arccos(R_{-y} M / RM) \quad (19)$$

– для II координатной четверти.

Адекватность программной реализации математической модели орбитального движения НКА системы ГЛОНАСС проверена путем проведения экс-

перимента с использованием навигационного приемника GPStation-6 (рис. 7). Эксперимент с использованием навигационного приемника GPStation-6 проводился в целях визуального сравнения прогнозируемой видимости НКА навигационным приемником и расчетными значениями видимых НКА по представленной ранее программе.



Рис. 7. НАП GPStation-6

Измерительный стенд в составе: антенна НАП, НАП и ПЭВМ представлен на рис. 8. в состав которого входят: НАП типа GPStation-6; кабель-адаптер «COM – COM»; блок антенный (внешняя антенна) НАП GPStation-6 с кабелем; кабель питания НАП, ПЭВМ. Для регистрации результатов измерений НАП применялась программа «WinRS».



Рис. 8. Схема измерительного стенда

На рис. 9 показан скриншот экрана ПЭВМ с результатами навигационных измерений НАП типа GPStation-6, в частности, созвездие видимых НКА СРНС ГЛОНАСС (на рис. 9 показаны красным цветом) и созвездие видимых НКА СРНС GPS (на рис. 9 показаны синим цветом) для минимальной величины угла возвышения НКА над горизонтом  $\delta_m = 7^\circ$  на 14.04.2022 г. 09:00:00 МСК.

Навигационный приемник располагался в точке с координатами (усредненные значения по выборке 1098 измерений НАП GPStation-6):  $\langle B \rangle = 60^\circ 00' 35,27''$  с.ш.;  $\langle L \rangle = 30^\circ 22' 30,26''$  в.д.;  $\langle H \rangle = 82,64$  м.

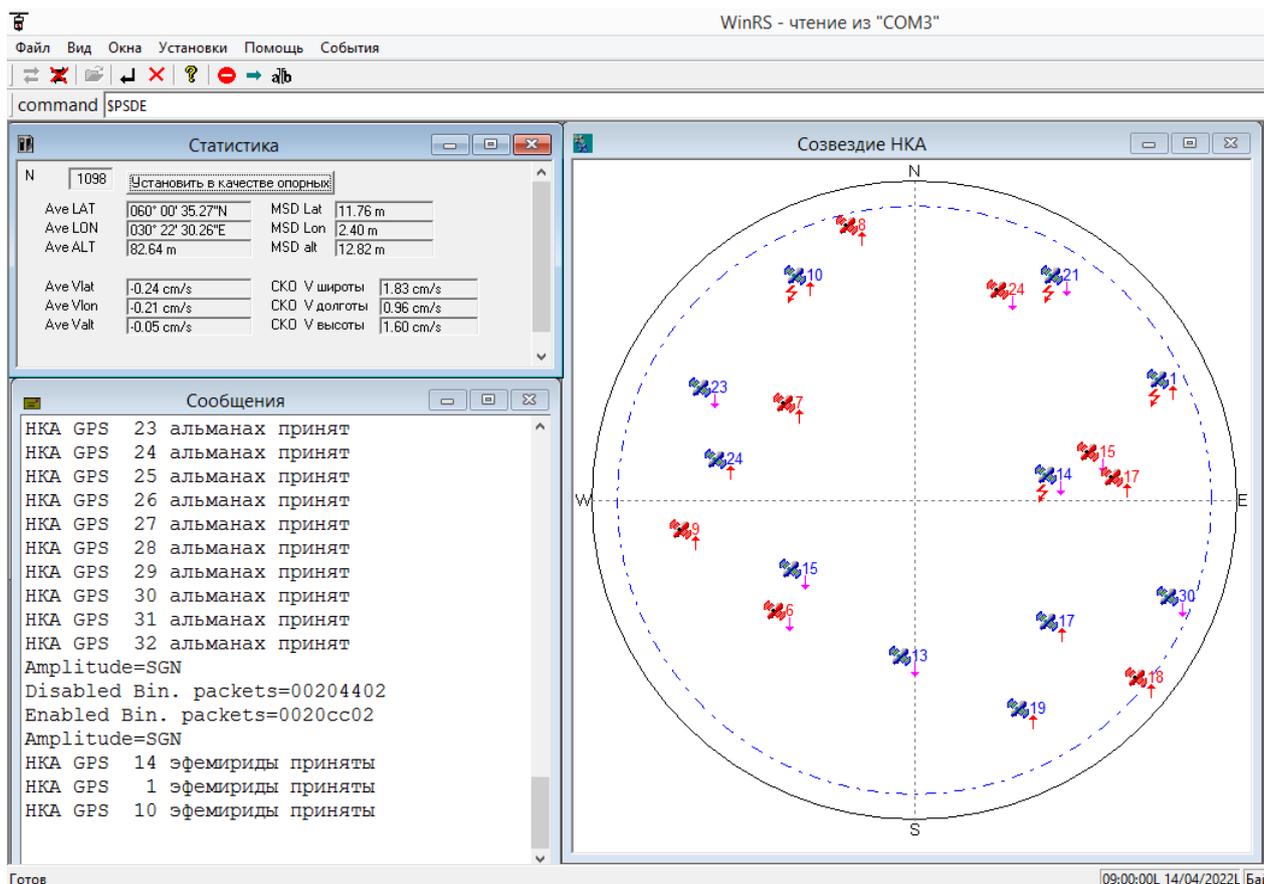


Рис. 9. Скриншот с результатами навигационных измерений

На рис. 10 приведена графическая интерпретация результатов расчета координат в геоцентрической фиксированной системе координат  $OXYZ$  ПЗ-90.11 ( $ECEF$ ) НКА ГЛОНАСС по данным альманаха системы на 14.04.2022 г. 09:00:00 МСК для видимых НКА с учетом минимальной величины угла возвышения НКА над горизонтом  $\delta_m = 7^\circ$  для наблюдателя расположенного в точке с координатами:  $B = 60^\circ 00' 35,27''$  с.ш.;  $L = 30^\circ 22' 30,26''$  в.д.;  $H = 82,64$  м.

Сравнение результатов эксперимента (рис. 9) и результатов моделирования (рис. 10) с точки зрения точности местонахождения в зоне видимости НКА СРНС (№№ 6, 7, 8, 9, 15, 17, 18, 24) позволяют сделать заключение об адекватной работе программной реализации математической модели орбитального движения НКА СРНС ГЛОНАСС.

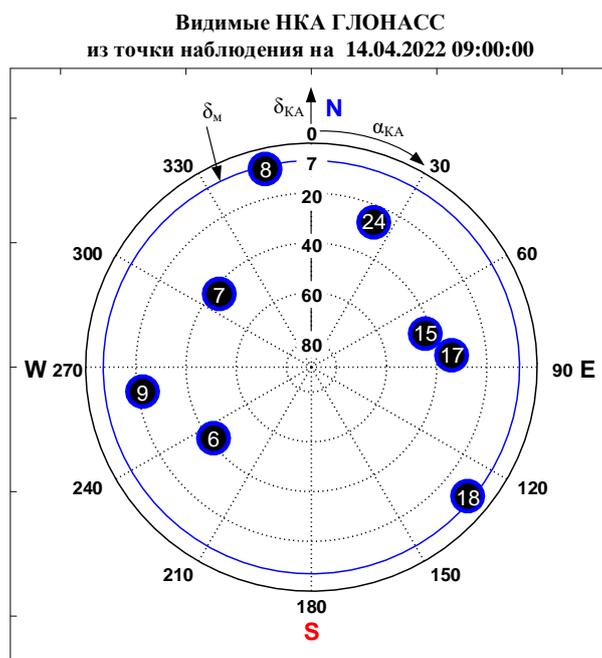


Рис. 10. Видимость КА СРНС ГЛОНАСС на 9:00 14.04.2022

### Алгоритм мониторинга ионосферы в интересах декаметровая радиосвязи с использованием СРНС

Приведем алгоритмизацию мониторинга ионосферы в интересах декаметровая радиосвязи (рис. 11) с использованием результатов моделирования (расчета) координат НКА СРНС ГЛОНАСС.

Исходными данными являются геодезические координаты радиостанций корреспондентов 1 и 2 (блок 1) и расчетная область с координатами НКА СРНС ГЛОНАСС на интересующую дату (даты) и интервал МДВ с необходимым шагом дискретизации (блок 2).

Расчет азимута на корреспондента 2 от корреспондента 1, а так же протяженности трассы  $R$  производится встроенной в *MATLAB* функцией  $[arclen, az] = distance(lat1, lon1, lat2, lon2)$  (блок 3).

Расчет границ видимости НКА по углам места (блок 4) производится по формулам (7)-(10).

Расчет границ видимости НКА по азимутам (блок 5) производится по формулам (11), (12).

Пересчет координат НКА из СК *ECEF* в координаты ТЦСК *NEU* (блок 6) производится по формулам (13). Начало ТЦСК *NEU* устанавливается в точке с геодезическими координатами корреспондента 1.

В блоке 7 производится расчет длин отрезков  $MI$  и  $RM$  через координаты своих граничных точек, а также длин отрезков  $R_xM$  или  $R_{-x}M$  или  $R_yM$  или  $R_{-y}M$  исходя из расположения проекции точки НКА на координатную плоскость  $X_{\text{тц}}(N)O_{\text{тц}}Y_{\text{тц}}(E)$ .

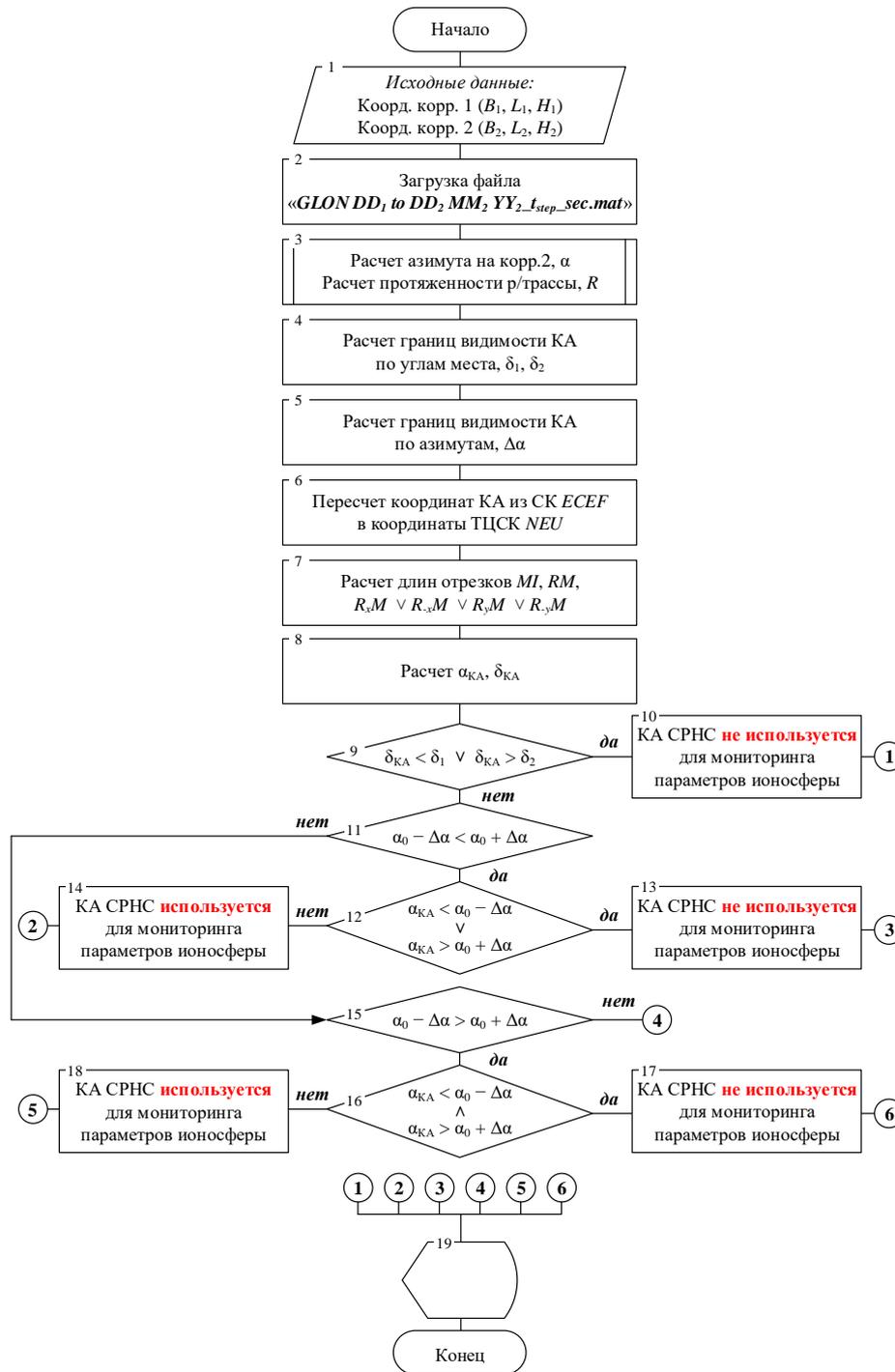


Рис. 11. Блок-схема мониторинга ионосферы в интересах дециметровый радиосвязи с использованием результатов моделирования координат НКА СРНС ГЛОНАСС

В блоке 8 производится расчет угла места и азимута на НКА из точки расположения корреспондента 1. Расчет угла места на НКА производится по формуле (14) или (15). Расчет азимута на НКА производится по одной из формул (16) или (17) или (18) или (19) исходя из расположения проекции точки НКА на координатную плоскость  $X_{\text{тц}}(N)O_{\text{тц}}Y_{\text{тц}}(E)$ .

Блоки 9–18 осуществляют выбор видимых НКА, сигналы которых используются для оценки ПЭС при мониторинге параметров ионосферы.

Блок 19 производит вывод результатов на экран ПЭВМ в виде графиков.

### Программная реализация мониторинга ионосферы в интересах декаметровая радиосвязи с использованием СРНС

Программное моделирование определения доступности НКА СРНС для проведения мониторинга ионосферы осуществлено в программной среде MATLAB R2022. Реализация позволяет по введенным исходным данным (координаты корреспондентов, дата и время прогноза) проводить моделирование орбитального движения для расчета положения всех НКА СРНС на орбите в требуемые моменты времени, рассчитывать количество видимых НКА СРНС в течение заданного времени, определять номера видимых НКА СРНС, рассчитывать сектор обзора для фильтрации НКА СРНС, участвующих в оценке ПЭС и отображать визуально полученные данные.

Внешний вид окна программы представлен на рис. 12. Программное окно содержит блок ввода данных, в котором производится выбор альманаха для прогнозирования орбитального движения, вводятся дата и время (МСК), в течение которых планируется осуществлять мониторинг состояния ионосферы и координаты корреспондентов.

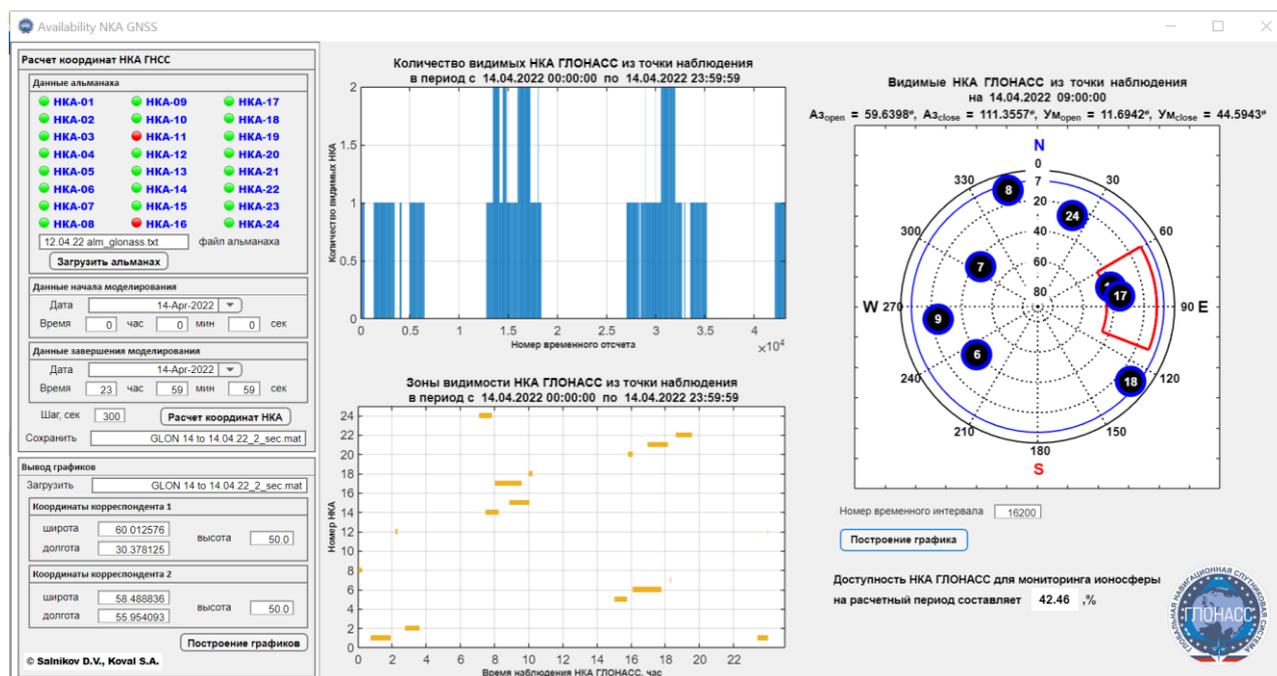


Рис. 12. Программное окно определения доступности НКА СРНС

После ввода исходных данных инициализация моделирования орбитального движения НКА СРНС ГЛОНАСС производится путём нажатия виртуальной кнопки «Расчет координат НКА», по завершении которого выводятся графики количества видимых НКА и их номера в течение всего расчетного периода.

да. По необходимости, по номеру временного отсчета имеется возможность вывести зоны видимости НКА в заданной области наблюдения.

Пример на рис. 12 приведен для расчета зон видимости из исходя из следующих данных: радиостанции корреспондентов находятся в г. Санкт-Петербург и г. Пермь (с координатами 60,012576 N, 30,378125 E и 58,488836 N, 55,954093 E соответственно); мониторинг ионосферы планируется проводить из г. Санкт-Петербург; дата проведения мониторинга – 14 апреля 2022 г. (с 00 ч 00 мин 00 сек до 23 ч 59 мин 59 сек), шаг 2 с.

### Обсуждение результатов

Данные моделирования показывают, что приём сигналов от НКА СРНС ГЛОНАСС не позволяет осуществлять непрерывный мониторинг ионосферы в заданной области. Так, на дату проведения эксперимента, для трассы Санкт-Петербург – Пермь, в промежутки времени с 3:40 по 7:15 МСК, с 10:25 по 15:00 МСК, с 19:55 по 23:20 МСК НКА СРНС ГЛОНАСС в требуемой зоне видимости наблюдаться не будут (см. рис. 13 а).

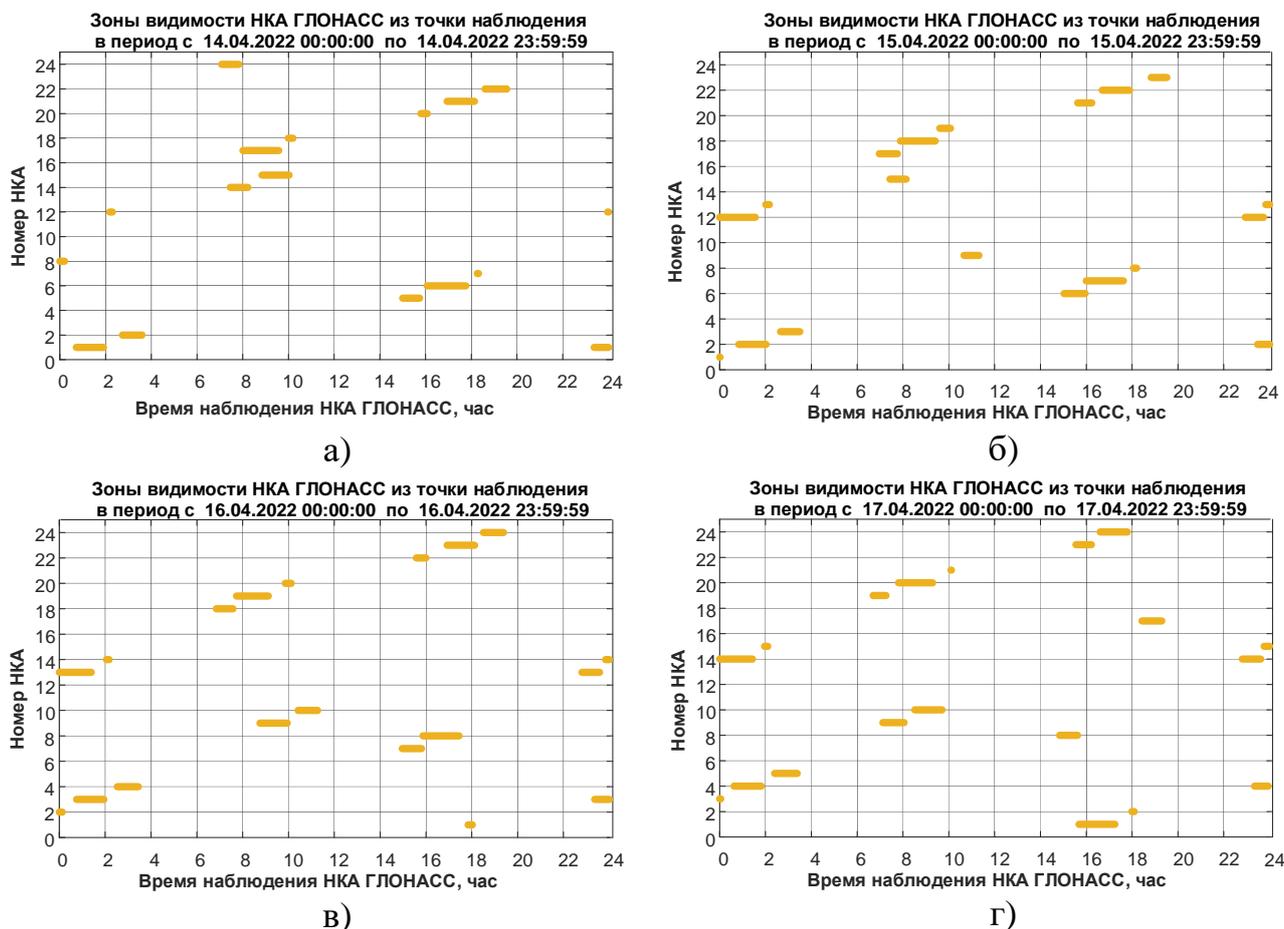


Рис. 13. Временные зоны доступности НКА ГЛОНАСС для мониторинга ионосферы на трассе Санкт-Петербург – Пермь: а) на 14 апреля 2022 г.; б) на 15 апреля 2022 г.; в) на 16 апреля 2022 г.; г) на 17 апреля 2022 г.

Результаты моделирования демонстрируют, что доступность НКА СРНС для мониторинга ионосферы составляет примерно 42,5 % от общего анализируемого времени выбранных суток.

Примерно равные доступности НКА СРНС ГЛОНАСС в требуемой зоне видимости, для мониторинга ионосферы на трассе Санкт-Петербург – Пермь, в промежутки времени с 4:00 по 7:00 МСК, с 11:00 по 15:00 МСК, с 20:00 по 23:00 МСК наблюдается и на другие даты: 15-17.04.2022 г. (см. рис. 13 б-г).

С учетом того, что время стационарности спокойной среднеширотной ионосферы составляет около 1 ч, можно сделать вывод о возможности проведения мониторинга ионосферы на час вперед. Так, например, по состоянию на 14 апреля 2022 г. возможно проведение мониторинга для организации связи в период с 00:00 по 4:40 МСК, с 7:15 по 11:25 МСК, с 16:00 по 20:55 МСК, с 23:20 по 23:59 МСК. Перерыв по возможности мониторинга ионосферы на расчетной трассе составил суммарно 9 ч 35 мин, что составляет 39 % от общего времени организации связи.

В периоды наблюдения в зоне видимости НКА СРНС доступны в течение времени, необходимого для проведения измерения требуемых параметров ионосферы (более 20 с непрерывно для определения интенсивности неоднородностей ионосферы в произвольной области при использовании современных приемников сигналов СРНС [6]). Для этого предварительно определяются номера НКА и их местоположение на орбите в каждый момент времени.

Отмечается, что полученные результаты справедливы при приеме сигналов только лишь от НКА группировки СРНС ГЛОНАСС. При использовании сигналов других группировок (BeiDou, GPS, Galileo) доступность НКА для мониторинга параметров ионосферы может быть существенно повышена, что планируется оценить в перспективе.

### Заключение

Разработанный способ определения доступности НКА для прогнозирования условий распространения радиоволн на трассах декаметровый радиосвязи позволяет определять возможность видимости НКА СРНС с учетом требуемого времени для мониторинга ионосферы в интересах организации декаметровый радиосвязи на произвольных трассах, что позволяет обеспечить оперативность планирования сеансов радиосвязи с требуемым качеством.

Показано, что при приеме сигналов СРНС ГЛОНАСС доступность НКА для проведения мониторинга ионосферы на трассе Санкт-Петербург – Пермь на 14 апреля 2022 г. составила порядка 42,5 %, что позволило обеспечить возможность мониторинга ионосферы на 61 % от общего времени возможной организации декаметровый радиосвязи с учетом времени стационарности ионосферы около 1 ч.

Показано, что на различные даты организации связи (14-17 апреля 2022 г.) НКА СРНС были доступны для мониторинга ионосферы примерно в одинаковые промежутки времени, что позволяет заранее планировать сеансы радиосвязи с обеспечением возможности мониторинга ионосферы.

Полученные результаты могут быть использованы для обеспечения мониторинга параметров ионосферы в интересах организации декаметрового радиосвязи на произвольных радиотрассах и проектирования перспективных адаптивных радиолиний декаметрового диапазона.

*Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда в рамках выполнения проекта № 22-21-00768 (<https://rscf.ru/project/22-21-00768>).*

### Литература

1. Ступницкий М. М., Лучин Д. В. Потенциал КВ-радиосвязи – для создания цифровой экосистемы России // Электросвязь. 2018. № 5. С. 49-54.
2. Серков В. П., Слюсарев П. В. Теория электромагнитного поля и распространение радиоволн. Часть 2. Распространение радиоволн. – Л.: ВАС, 1973. – 255 с.
3. Борисова Т. Д., Благовещенская Н. Ф., Калишин А. С. Прогнозирование условий распространения декаметровых радиоволн в арктическом регионе // Проблемы Арктики и Антарктики, 2017. № 3 (113). С. 78-86.
4. Афраимович Э. Л., Перевалова Н. П. GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли. – Иркутск: ГУ НЦ РВХ ВСНЦ СО РАМН, 2006. – 480 с.
5. Коваль С. А. Ионосферный мониторинг в интересах перспективных адаптивных систем декаметрового радиосвязи: современное состояние и перспективы развития // Системы управления, связи и безопасности. 2020. № 4. С. 73-100. DOI: 10.24411/2410-9916-2020-10403.
6. GPStation-6. GNSS Ionospheric Scintillation and TEC Monitor (GISTM) Receiver User Manual (OM-20000132), Rev. 2, 2012 – 89 p.
7. Альперт Я. Л. Распространение электромагнитных волн и ионосфера. – М.: Наука, 1972. – 563 с.
8. Девис К. Радиоволны в ионосфере. Пер с англ. – М.: Мир, 1973. – 502 с.
9. Калинин А. И., Черенкова Л. Е. Распространение радиоволн и работа радиолиний. – М.: Связь, 1971. – 439 с.
10. Маслов О. Н., Пашинцев В. П. Модели трансionoсферных радиоканалов и помехоустойчивость систем космической связи. – Самара: ПГАТИ, 2006 – 357 с.
11. Пашинцев В. П., Коваль С. А., Потягов Д. А., Скорик А. Д., Сенокосов М. А. Уточненный метод определения интервала пространственной корреляции замираний в однолучевой декаметровой радиолинии // Журнал радиоэлектроники. 2021. № 2. – URL: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.2.6> (дата обращения 24.05.2022).
12. Коваль С. А., Пашинцев В. П., Копытов В. В., Манаенко С. С., Белоконь Д. А. Метод определения интервала частотной корреляции замираний в однолучевой декаметровой радиолинии // Системы управления, связи и безопасности. 2022. № 1. С. 67-103. DOI: 10.24412/2410-9916-2022-1-67-103.
13. Пашинцев В. П., Коваль С. А., Стрекозов В. И., Ляхов А. В. Обнаружение и пеленгация искусственных ионосферных образований с помощью спутниковых радионавигационных систем. // Теория и техника радиосвязи. 2014. № 1. С. 88-93.
14. Пашинцев В. П., Коваль С. А., Галушко Ю. И., Сенокосова А. В., Грибанов Е. В. Способ определения величины интенсивности неоднородностей

ионосферы по данным вертикального зондирования // Патент РФ на изобретение RU 2403592 С1, опубл. 10.11.2010, бюл. № 31.

15. Pashintsev V.P., Peskov M. V., Kalmykov I. A., Zhuk A. P., Toiskin V. E. Method for forecasting of interference immunity of low frequency satellite communication systems // AD ALTA-Journal of interdisciplinary research. 2020. Vol. 10. № 1. P. 367-375.

16. ГЛОНАСС. Навигационный радиосигнал в диапазонах L1, L2 (редакция 5.1). Интерфейсный контрольный документ. – М.: Российский НИИ космического приборостроения, 2008. – 74 с.

17. Сальников Д. В., Мешков И. С., Долгая А. А. Оценка интегральной доступности глобальной навигационной спутниковой системы // Известия Института инженерной физики. 2018. № 1 (47). С. 32-38.

18. Параметры Земли 1990 (ПЗ-90.11). Справочный документ. – М.: Военно-топографическое управление, 2020 – 62 с.

19. Прикладной потребительский центр информационно-аналитического центра координатно-временного и навигационного обеспечения: Официальный сайт [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.glonass-iac.ru> (дата обращения 24.05.2022).

20. Стандарт эксплуатационных характеристик открытого сервиса. Редакция 2.2. – Королёв: ИАЦ КВНО ФГУП ЦНИИмаш, 2019 – 61 с.

21. ГЛОНАСС. Модернизация и перспективы развития. / под ред. А. И. Перова. – М.: Радиотехника, 2020. – 1072 с.

22. Огородова Л. В. Высшая геодезия. – М.: Геодезкартиздат, 2006. – 384 с.

## References

1. Stupnitskiy M. M., Luchin D. V. Potentsial KV-radiosviazi – dlia sozdaniia tsifrovoi ekosistemy Rossii [The potential of HF radio communication – to create a digital ecosystem in Russia]. *Electrosvyaz*, 2018, no. 5, pp. 49-54 (in Russian).

2. Serkov V. P., Slyusarev P. V. *Teoriya elektromagnitnogo polya i rasprostraneniye radiovoln. Chast 2. Rasprostraneniye radiovoln* [Theory of the electromagnetic field and the propagation of radio waves. Part 2. Propagation of radio waves]. Leningrad, Military Communications Academy Publ., 1973, 255 p. (in Russian).

3. Borisova T. D., Blagoveshchenskaya N. F., Kalishin A. S. Forecasting the conditions of the decameter radio wave propagation in the Arctic region. *Arctic and Antarctic Research*, 2017, no. 3 (113), pp. 78-86 (in Russian).

4. Afrajmovich E. L., Perevalova N. P. *GPS-monitoring verhnej atmosfery Zemli* [GPS monitoring of the top atmosphere of Earth]. Irkutsk, Public institution Scientific center of the East Siberian scientific center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences Publ., 2006, 480 p. (in Russian).

5. Koval S. A. Ionospheric monitoring for the benefit of perspective adaptive systems of a decameter radio: current state and prospects of development. *Systems of Control, Communication and Security*, 2020, no. 4, pp. 73-100 (in Russian). DOI: 10.24411/2410-9916-2020-10403.

6. GPStation-6. GNSS Ionospheric Scintillation and TEC Monitor (GISTM) Receiver User Manual (OM-20000132), Rev. 2, 2012, 89 p.

7. Alpert Ya. L. *Rasprostraneniye elektromagnitnykh voln i ionosfera* [Propagation of electromagnetic waves and the ionosphere]. Moscow, Nauka Publ., 1972, 563 p. (in Russian).
8. Davies K. *Ionospheric radio waves*. Blaisdell Publishing Co., 1969, 477 p.
9. Kalinin A. I., Cherenkova L. E. *Rasprostranenie radiovoln i rabota radiolinij* [Distribution of radio waves and work of radio lines]. Moscow, Svyaz Publ., 1971, 439 p. (in Russian).
10. Maslov O. N., Pashintsev V. P. *Modeli transionosfernykh radiokanalov i pomekhoustojchivost' sistem kosmicheskoy svyazi* [Models of transionospheric radio channels and noise stability of systems of space communication]. Samara, Volga region state academy of telecommunications and informatics Publ., 2006. 357 p. (in Russian).
11. Pashintsev V. P., Koval S. A., Potyagov D. A., Skorik A. D., Senokosov M. A. Refined method for determining the spatial correlation interval of the fading in a single-beam decameter radio link. *Journal of Radio Electronics*. 2021. no. 2. Available at: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.2.6> (accessed 24 May 2022) (in Russian).
12. Koval S. A., Pashintsev V. P., Kopytov V. V., Manaenko S. S., Belokon D. A. Method for determining the fading frequency correlation interval in a single-beam decameter radio link. *Systems of Control, Communication and Security*, 2022, no. 1, pp. 67-103. DOI: 10.24412/2410-9916-2022-1-67-103 (in Russian).
13. Pashintsev V. P., Koval S. A., Strekozov V. I., Lyahov A. V. Artificial ionospheric buildup detection and direction finding by means of satellite navigation systems. *Radio Communication Theory and Equipment*, 2014, no. 1, pp. 88-93 (in Russian).
14. Pashintsev V. P., Koval S. A., Galushko Yu. I., Senokosova A. V., Gribanov E. V. *Sposob opredeleniya velichiny intensivnosti neodnorodnostey ionosfery po dannym vertikalnogo zondirovaniya* [Method for determining the intensity of ionospheric inhomogeneities according to vertical sounding data]. Patent Russia, no. 2403592. 2010.
15. Pashintsev V. P., Peskov M. V., Kalmykov I. A., Zhuk A. P., Toiskin V. E. Method for forecasting of interference immunity of low frequency satellite communication systems. *AD ALTA-Journal of interdisciplinary research*, 2020, vol. 10, no. 1, pp. 367-375.
16. GLONASS. Navigation radiosignal in bands L1, L2 (Edition 5.1). Interface control document. Moscow, Russian Institute of Space Device Engineering Publ., 2008, 74 p.
17. Salnikov D. V., Meshkov I. S., Dolgaya A. A. Evaluation of the integrated availability of the global navigation satellite system. *Izvestiya Instituta inzhenernoy fiziki*, 2018, no. 1 (47), pp. 32-38 (in Russian).
18. Parameters of the Earth 1990 (PZ-90.11). Reference document. Moscow, Military topographic department Publ., 2020, 62 p. (in Russian).
19. Application consumer center of the information-analytical center of coordinate-time and navigation support: Official site. Available at: <https://www.https://www.glonass-iac.ru/en/> (accessed 24 May 2022).
20. Open Service Performance Standard. Edition 2.2. Korolyov, Information and analytical center for coordinate-time and navigation support of the Federal State

Unitary Enterprise Central Research Institute of Mechanical Engineering Publ., 2019, 61 p. (in Russian).

21. Perov A. I., Bakitko R. V., Dvorkin V. V., Karutin S. N., Korogodin I. V., Nagin I. A., Povalyaev A. A., Fatkulin R. F., Shatilov A. Yu. *GLONASS. Modernizatsiya i perspektivy razvitiya* [GLONASS. Modernization and development prospects]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2020, 1072 p. (in Russian).

22. Ogorodova L. V. *Vysshaya geodeziya* [Higher geodesy]. Moscow, Geodezkartizdat Publ., 2006, 384 p. (in Russian).

Статья поступила 8 июня 2022 г.

### Информация об авторах

*Коваль Станислав Андреевич* – кандидат технических наук. Докторант. Военная академия связи имени Маршала Советского Союза С.М. Буденного. Область научных интересов: мониторинг параметров ионосферы в интересах декаметровой связи. E-mail: [\\_bober\\_@mail.ru](mailto:_bober_@mail.ru)

Адрес: 194064, Россия, г. Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., д. 3.

*Сальников Денис Владимирович* – кандидат технических наук. Доцент кафедры «Военных систем космической, радиорелейной, тропосферной связи и навигации». Военная академия связи имени Маршала Советского Союза С. М. Буденного. Область научных интересов: мониторинг параметров качества спутниковых радионавигационных систем. E-mail: [denis\\_salnikov@mail.ru](mailto:denis_salnikov@mail.ru)

Адрес: 194064, Россия, г. Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., д. 3.

*Пашинцев Владимир Петрович* – доктор технических наук, профессор. Профессор кафедры «Информационная безопасность автоматизированных систем». Северо-Кавказский федеральный университет. Область научных интересов: влияние возмущений ионосферы на показатели качества систем спутниковой связи и навигации. E-mail: [pasintsevp@mail.ru](mailto:pasintsevp@mail.ru)

Адрес: 355017, Россия, г. Ставрополь, ул. Пушкина, д. 1.

*Михайлов Дмитрий Александрович* – лаборант кафедры «Инфокоммуникации». Северо-Кавказский федеральный университет. Область научных интересов: повышение надежности декаметровой связи в условиях многолучевости. E-mail: [mixayloff.dimaaylov@yandex.ru](mailto:mixayloff.dimaaylov@yandex.ru)

Адрес: 355017, Россия, г. Ставрополь, ул. Пушкина, д. 1.

---

## Method for determining the availability of global positioning system for monitoring ionospheric parameters in the interests of decameter radio communication

S. A. Koval, D. V. Salnikov, V. P. Pashintsev, D. A. Mikhaylov

**Problem statement:** *It is known that it is possible to carry out diagnostics and forecasting of the conditions for the propagation of decameter radio waves using transionospheric sounding based on the reception of signals from satellite radio navigation systems. In this case, it is necessary to take into account the visibility of navigation spacecraft in the required zone (ionospheric monitoring area) for a time sufficient for statistical accumulation of information. There is a need to numerically determine the availability of naviga-*

tion spacecraft for monitoring the ionosphere, i.e. the ability of the satellite radio navigation system to provide the consumer's navigation equipment with a navigation signal from navigation spacecraft visible in the required area at a given time interval. By a numerical measure of the availability of navigation spacecraft for monitoring the ionosphere in a given area, we mean the percentage of time (on a certain interval) during which at least one navigation spacecraft will be visible at the location of the consumer's navigation equipment and the duration of measurement of ionospheric parameters from visible navigation spacecraft. devices will be no less necessary for monitoring the ionosphere (sufficient for the statistical accumulation of information) in the required area. **The purpose of work** is the development of a method for determining the availability of navigation spacecraft of satellite radio navigation systems for predicting the conditions for the propagation of radio waves on the routes of decameter radio communication. **The novelty** consists in developing a method for monitoring the ionosphere in the interests of decameter radio communication using the results of modeling the coordinates of navigation spacecraft of the GLONASS satellite radio navigation system and taking into account the relative position of correspondents, the date and time of organizing a radio communication session. **Result:** a method has been developed for determining the availability of navigation spacecraft of satellite radio navigation systems for predicting the conditions for the propagation of radio waves on arbitrary decameter radio communication paths, taking into account the coordinates of correspondents. **Practical importance:** the developed method for determining the availability of navigation spacecraft for predicting the conditions of radio wave propagation on decameter radio communication paths makes it possible to determine the visibility of navigation spacecraft of satellite radio navigation systems during the required time for monitoring the ionosphere in the interests of organizing decameter radio communication on arbitrary paths. The developed method makes it possible to plan radio communication sessions in advance with the possibility of monitoring the ionosphere.

**Keywords:** decameter radio communication, ionospheric monitoring, satellite radio navigation system, orbital motion.

### Information about Authors

*Stanislav Andreevich Koval* – Ph.D. of Engineering Sciences. Doctoral Candidate. Military Communications Academy named after the Marshal of the Soviet Union S. M. Budenny. Field of research: monitoring of ionosphere parameters for decameter radio. E-mail: [\\_bober\\_@mail.ru](mailto:_bober_@mail.ru)

Address: Russia, 194064, St. Petersburg, Tikhoretsky avenue, 3.

*Denis Vladimirovich Salnikov* – Ph.D. of Engineering Sciences. Associate Professor at the De-partment of Military systems of space, radio relay, tropospheric communication and navigation. Military Communications Academy named after the Marshal of the Soviet Union S. M. Budenny. Field of research: monitoring of quality parameters of satellite radio navigation systems. E-mail: [denis\\_salnikov@mail.ru](mailto:denis_salnikov@mail.ru)

Address: Russia, 194064, St. Petersburg, Tikhoretsky avenue, 3.

*Vladimir Petrovich Pashintsev* – Dr. habil. of Engineering Sciences, Full Professor. Professor of at the Department of Information Security of Automated Systems. North Caucasus Federal University. Field of research: the influence of ionospheric disturbances on the quality indicators of satellite communication and navigation systems. E-mail: [pasintsevp@mail.ru](mailto:pasintsevp@mail.ru)

Address: Russia, 355017, Stavropol, Pushkina street, 1.

*Dmitry Aleksandrovich Mikhaylov* – Laboratory assistant of the Department of Infocommunications. North Caucasus Federal University. Field of research: increasing the reliability of decameter communication in multipath conditions. E-mail: [mixayloff.dimaaylov@yandex.ru](mailto:mixayloff.dimaaylov@yandex.ru)

Address: Russia, 355017, Stavropol, Pushkina street, 1.