

## Наклонная двумерная фазоразностная радиотомография ионосферы

О.И. Барбошкин<sup>1,2</sup>, С.В. Трусов<sup>1</sup>, А.А. Романов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ОАО «Российские космические системы», Москва 111250, Россия

E-mail: baraboshkin.oleg@gmail.com

<sup>2</sup>Московский физико-технический институт (государственный университет)  
Долгопрудный 141700, Россия

В методике двумерного радиотомографического мониторинга ионосферы по цепочкам станций используется сигнал низкоорбитального спутника, подспутниковый трек которого проходит в непосредственной близости от станций, при этом геометрия эксперимента считается плоской. Это условие сильно ограничивает количество используемых пролетов. При этом характеристики спутникового сигнала и приемников таковы, что позволяют принимать сигналы при малых углах места спутника, то есть использование боковых пролетов технически предоставляется возможным. Сигналы спутников, проходящих в стороне от цепочки приемников, несут много потенциально ценной информации о состоянии ионосферы, однако в настоящий момент не могут быть применены или применяются некорректно в существующей методике обработки данных. В работе рассмотрены проблемы, возникающие при использовании боковых пролетов спутников в классической постановке задачи радиотомографии ионосферы. Проведена оценка влияния такой геометрии пролета спутника на исходные фазоразностные данные по сравнению с плоским случаем. Предложен метод наклонной томографии, позволяющий корректно формировать проекционный оператор, исключая искажения, связанные с трехмерностью рассматриваемой задачи. Проведено моделирование решения задачи наклонной томографии; получена оценка возникающих ошибок при её решении аналогично вертикальному плоскому случаю; подтверждена эффективность рассматриваемого подхода.

**Ключевые слова:** радиотомография, ионосфера.

### Введение

В настоящее время в системах, реализующих двумерную радиотомографическую (РТ) реконструкцию ионосферы по цепочкам приемников (Куницын и др., 2007), используется сигнал низкоорбитальных спутников, подспутниковый трек которого проходит в непосредственной близости от приемников, при этом геометрия эксперимента считается плоской и вертикальной, т.е. область радиотрасс приемник-передатчик лежит в плоскости, проходящей через сеть приемников и центр Земли. Данное условие сильно ограничивает количество используемых пролетов и, как следствие, количество томограмм. В то же время сигналы спутников, проходящих в стороне от цепочки приемников, несут много ценной информации о состоянии пройденной ионосферы, однако в настоящий момент не могут быть применены или применяются некорректно в существующей методике обработки данных. Реализация возможности корректного использования боковых пролетов спутников для получения наклонных разрезов поля электронной концентрации позволит значительно увеличить пространственное покрытие и частоту получения информации о состоянии ионосферы только за счет изменения методики обработки и соответствующего программного обеспечения. В работе рассмотрены пробле-



Тогда длина отрезка луча приемник-спутник  $l$ , по которому ведется интегрирование, равна:

$$l = \sqrt{(R + h_{sat})^2 + R^2 - 2rR(\cos \omega t + \cos \rho - 1)},$$

где  $h_{sat}$  – высота орбиты спутника. Оценим влияние угла  $\rho$  на измеряемую фазу. В первом приближении можно считать, что интеграл электронной концентрации по радиотрассе пропорционален ее длине  $l$ . Необходимо также учитывать, что измерения фазоразностные, то есть при вычислениях используется производная от фазы (Куницын и др., 2007). Поэтому для оценки ошибок в измерениях нужно найти отношение производных  $k = l'(\omega t, \rho) / l'(\omega t, 0)$ .

$$l' = \frac{\partial l}{\partial t} = \frac{R(R + h_{sat}) \omega \sin(\omega t)}{\sqrt{(R + h_{sat})^2 + R^2 - 2rR(\cos \omega t + \cos \rho - 1)}} = \frac{R(R + h_{sat}) \omega \sin(\omega t)}{l},$$

$$k(\omega t, \rho) = \frac{l(\omega t, 0)}{l(\omega t, \rho)}.$$

Вместо  $\rho$  удобнее воспользоваться максимальным углом возвышения  $\beta_{max}$  (рис. 1), который характеризует наклон реконструируемой области:

$$\beta_{max} = \frac{\pi}{2} - \arcsin\left(\frac{R + h_{sat}}{l} \sin \rho\right).$$

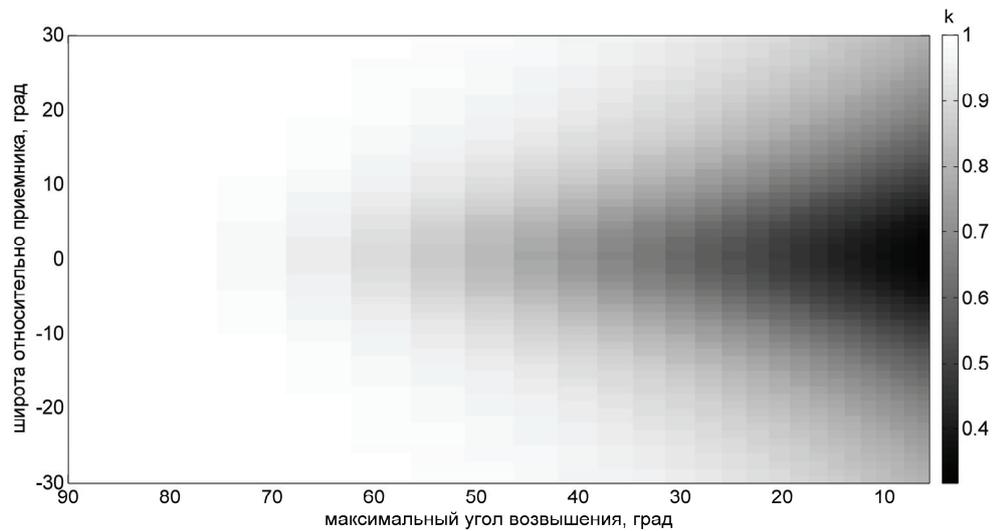


Рис. 2. Значения коэффициента  $k$  при различных значениях  $\omega t$  и  $\beta_{max}$

На рис. 2 показано распределение коэффициента  $k$  на диапазонах углов, охватывающих все реализуемые на практике варианты. Значение производной фазы сигнала при боковом пролете занижены по сравнению с пролетом над приемником. Разница макси-

мальна при минимальных для данного пролета длинах радиотрасс и достигает 50-60% при высоких значениях наклона плоскости реконструкции. Поэтому, при применении классического алгоритма томографической реконструкции для бокового пролета, получающееся распределение электронной концентрации существенно искажается, что подтверждается моделированием о котором будет сказано далее. Этими искажениями можно пренебречь при пролетах со значением максимального угла возвышения более  $70^\circ$ , что на данный момент и используется для увеличения количества сеансов в системах двумерного томографического мониторинга ионосферы.

### Предлагаемый метод

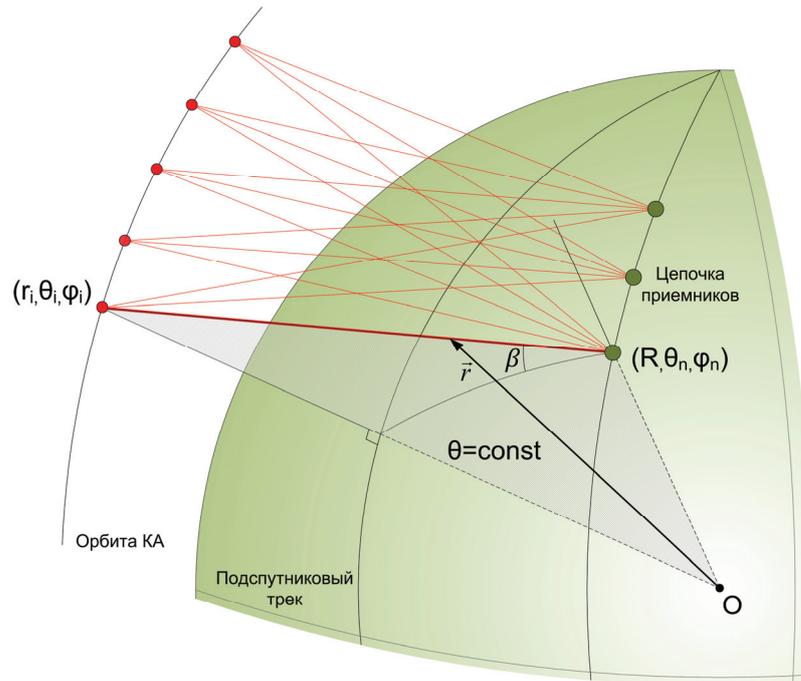
Так как, в отличие от классического плоского случая, геометрия задачи принципиально трехмерна (рис. 2), для каждого измерения введем сферическую систему координат  $(r, \theta, \varphi)$ , у которой начало координат  $O$  совпадает с центром Земли,  $(r_i, \theta_i, \varphi_i)$  – координаты спутника,  $(R, \theta_n, \varphi_n)$  – координаты приемника, причем система координат выбрана так, что  $\theta_i = \theta_n = const$ . В плоскости  $\theta = const$  легко найти формулу для элемента длины луча спутник-приемник  $d\sigma$ . Для краткости вывод опускается, покажем лишь результат:

$$d\sigma^2 = \frac{r^2}{r^2 - R^2 \cos^2 \beta} dr^2, \quad (1)$$

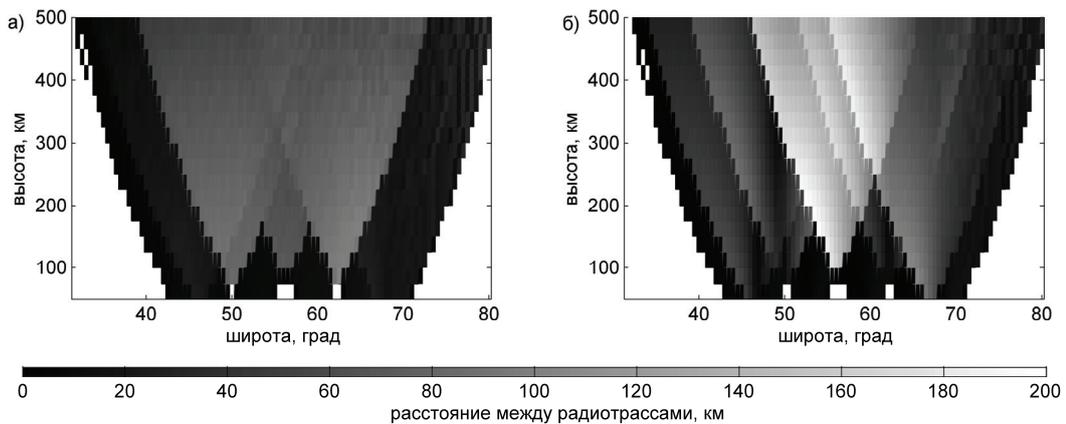
где  $\beta$  – угол возвышения спутника,  $R$  – радиус Земли. Заметим, что  $d\sigma^2$  зависит только от длин отрезков и углов, которые инвариантны относительно преобразований вращения системы координат. Таким образом, выражение (1) выполняется в системе координат, которая едина для всех измерений, вне зависимости от координат приемника и спутника. Эту систему координат удобно принять геоцентрической  $(h, lon, lat)$ , где  $h$  – высота,  $lon$  – долгота,  $lat$  – широта. Формула для элемента длины луча (1) совпадает с аналогичной формулой в классической двумерной постановке задачи (Куницын и др., 2007), отличаясь лишь углом  $\beta$ , который нужно считать в трехмерных координатах.

Далее допустим, что электронная концентрация на выбранной высоте и широте практически не меняется в некотором диапазоне долгот. Тогда задачу нахождения распределения электронной концентрации  $N$  можно решать в двух координатах высоты и широты  $(h, lat)$ , тем самым пренебрегая изменением электронной концентрации по долготе. Такое условие необходимо и в классической двумерной постановке задачи практически для любой реальной конфигурации томографической цепи и пролета спутника, так как,

во-первых, спутник крайне редко пролетает точно над приемниками и приходится использовать пролеты, для которых максимальное возвышения спутника попадает в некоторый диапазон углов. Во-вторых, расположение приемников не всегда оптимально из-за инфраструктурных ограничений по их размещению. На *рис. 4* показано распределение максимальных по широте расстояний между лучами, проходящими через каждую ячейку сетки реконструкции  $(\Delta h, \Delta lat)$ , для томографической цепи ИПГ1 (Алпатов и др., 2012) при пролете спутника COSMOS2545.



*Рис. 3. Схема эксперимента по наклонной лучевой РТ*



*Рис. 4. Максимальное по широте расстояние между лучами, проходящими через одну ячейку сетки реконструкции, для томографической цепи ИПГ1 при пролетах с максимальным углом возвышения: а)  $87^\circ$ ; б)  $60^\circ$*

Моделирование показывает, что даже при оптимальных пролетах в некоторых областях реконструкции зондирующие лучи проходят через одну ячейку  $(\Delta h, \Delta lat)$  на расстоянии 100 км друг от друга. При малых значениях максимального угла возвышения это расстояние может достигать 400 км, но и в таких случаях крупномасштабные неоднородности должны восстанавливаться.

В классическом подходе (Куницын и др., 2007) при реализации фазоразностного метода производная проекционного оператора берется по приращению  $\Delta\alpha$  угловой координаты передатчика. Так как орбита спутника почти круговая, угловую скорость  $\omega$  можно считать постоянной и  $\Delta\alpha = \omega\Delta t$ . Тогда фазоразностный подход реализуется путем опрелеления линейных интегралов в моменты времени  $\{t_i\}$  и  $\{t_i + \Delta t\}$ , тем самым формируя два проекционных оператора  $L_{ij}$  и  $L'_{ij}$ , по которым составляется система линейных уравнений вида:

$$\frac{L'_{ij} - L_{ij}}{\Delta t} x_j = d_i, \quad (2)$$

где  $x_j$  – значение электронной концентрации в  $j$ -ой ячейке реконструкции,  $d_i$  – производная разности фаз в момент времени, соответствующий  $i$ -тому лучу. В такой форме фазоразностный подход можно применять и в задаче наклонной томографии.

Учитывая то, что формула для элемента длины луча (1) совпадает с аналогичной формулой для классического случая, учитывая (2) и пренебрегая зависимостью электронной концентрации от долготы в пределах ячейки реконструкции  $(\Delta h, \Delta lat)$ , задача нахождения электронной концентрации при боковых пролетах полностью сводиться к классическому алгоритму, необходимо только использовать корректное значение угла  $\beta$ . Для его нахождения удобно выразить координаты спутника и приемника в геоцентрической декартовой системе координат и воспользоваться формулами векторного произведения. Отображение результатов осуществляется в виде зависимости электронной концентрации от широты и высоты на плоскости, но для каждой ячейки сетки реконструкции можно дополнительно определить усредненную по пересекающим ее лучам долготу.

### Методика и результаты моделирования

Для проверки предложенного подхода было проведено моделирование данных наклонного пролета в пакете MATLAB и решена задача восстановления электронной концентрации классическим методом и предлагаемым. Расположение приемников в Охе, Ногликах и Южно-Сахалинске воспроизводит сахалинскую цепочку (Трусов и др., 2009).

Время приема сигнала каждым приемником и конфигурация пролета повторяет реальный сеанс со спутником COSMOS2454 за 22.08.2011 с началом в 5 ч. 16 мин. и максимальным углом возвышения  $39^\circ$ . Трехмерное модельное распределение электронной концентрации в ионосфере построено для момента времени начала пролета спутника с помощью модели NeQuick. По известной геометрии пролета и электронной концентрации в ионосфере рассчитываются модельные данные фазы  $\varphi_d$  путем численного интегрирования электронной концентрации  $N$  по радиотрассам с соответствующим коэффициентом (Куницын и др., 2007):

$$\varphi_d = -\frac{55}{64} \lambda r_e \int N d\sigma,$$

где  $r_e$  - классический радиус электрона,  $\lambda$  - длина волны меньшей частоты 150 МГц. Фазоразностные данные находятся из фазовых путем нахождения разности для моментов времени, соответствующих частоте дискретизации 16 Гц.

Разница между функцией распределения электронной концентрации  $\tilde{N}$ , полученной в результате решения задачи реконструкции, и модельной функцией распределения  $N$  оценивались по нормам  $l^2$  и  $l^\infty$ :

$$\delta(l^2) = \frac{\sqrt{\sum_i (N_i - \tilde{N}_i)^2}}{\sqrt{\sum_i N_i^2}}, \quad \delta(l^\infty) = \frac{\max_i |N_i - \tilde{N}_i|}{\max_i |N_i|}.$$

В расчет бралась только центральная часть реконструкции, в которой радиотрассы пересекают область максимума электронной концентрации.

На *рис. 5* показано модельное распределение электронной концентрации в плоскости реконструкции (а) и результаты решения обратной задачи классическим методом (б) и с учетом наклона плоскости реконструкции (в). Расположение приемников обозначено желтыми треугольниками, а области радиовидимости для каждого приемника - крайними радиотрассами.

Моделирование показывает, что классический метод решения обратной задачи для наклонного пролета не подходит, так как в полученной реконструкции присутствуют существенные искажения. Ошибка реконструкции, как было показано ранее, зависит от максимального угла возвышения. В данном случае при значении  $\beta_{max} = 39^\circ$ , ошибка реконструкции составляет  $\delta(l^2) = 0,173$ ,  $\delta(l^\infty) = 0,195$ . Применение рассматриваемого метода позволяет избавиться от искажений и уменьшить ошибку до  $\delta(l^2) = 0,015$ ,  $\delta(l^\infty) = 0,032$ , то есть практически исключить ошибки, связанные с несовершенной геометрией расположения приемников и пролета спутника.

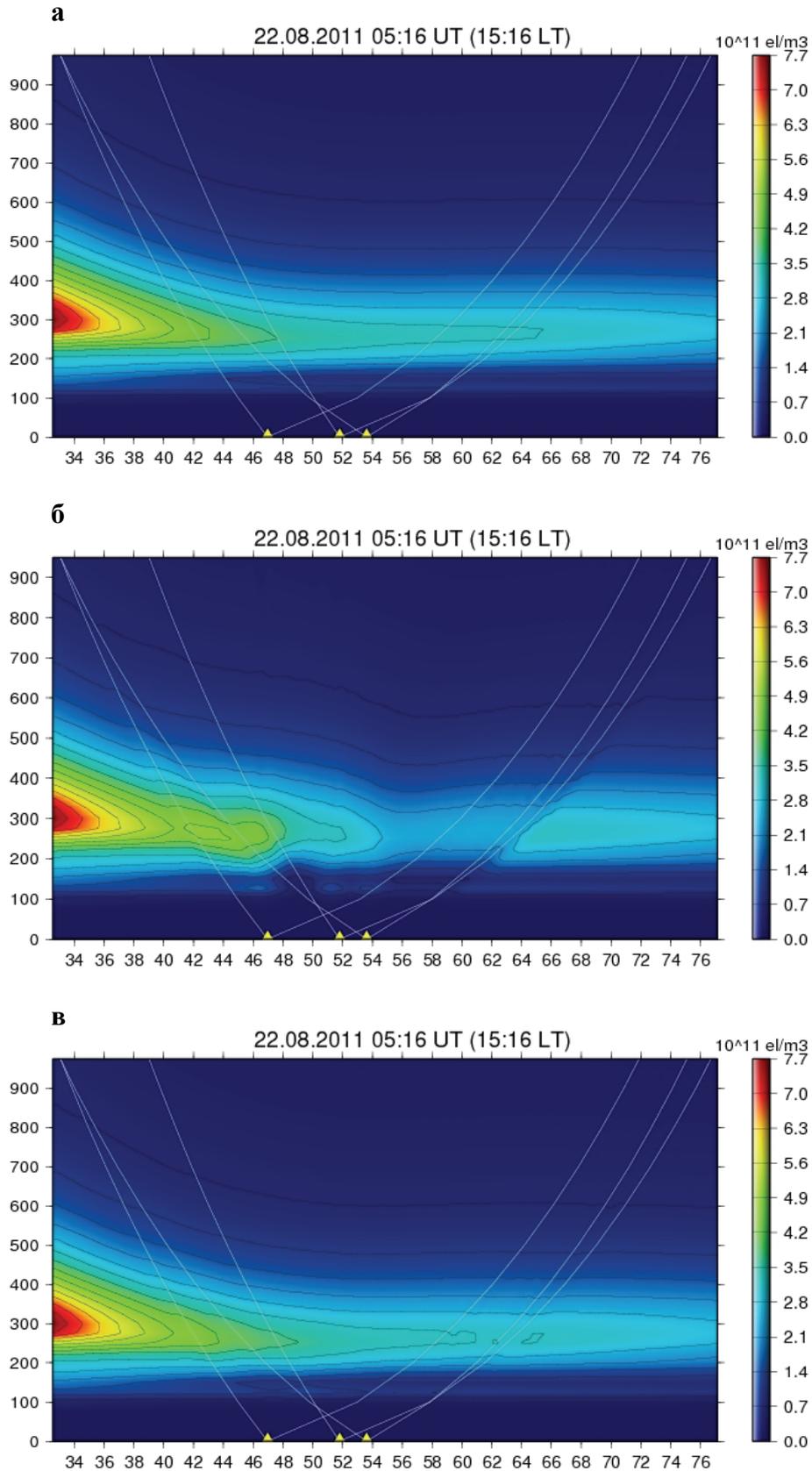


Рис. 5. Модельное распределение электронной концентрации в плоскости реконструкции (а); результат решения обратной задачи классическим методом (б); с учетом наклона плоскости реконструкции (в)

## Вывод

В данной работе рассмотрена проблема использования при двумерном томографическом мониторинге ионосферы сигналов спутников, пролет которых характеризуется малым углом максимального возвышения. Предложен метод, позволяющий корректно формировать проекционный оператор, исключая искажения, связанные с несовершенством геометрии. Это позволяет в несколько раз увеличить количество сеансов приема сигнала со спутника и получать больше реконструкций, что очень важно в условиях сокращающейся спутниковой группировки. Алгоритм решения задачи существенно не меняется, что позволяет быстро реализовать рассмотренный метод в уже функционирующих системах томографии ионосферы.

## Литература

1. Алпатов В.В., Куницын В.Е., Лапшин В.Б., Романов А.А., Тасенко С.В. Опыт создания росгидрометом сети радиотомографии для исследования и мониторинга ионосферы // Гелиогеофизические исследования, Выпуск 2, 2012, С. 60–71
2. Куницын В.Е., Терещенко Е.Д., Андреева Е.С. Радиотомография ионосферы. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. 336 с.
3. Трусов С.В., Романов А.А., Новиков А.В., Романов А.А. Информационная технология автоматизированной обработки данных радиотомографии ионосферы // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2009. Выпуск 6. Том 2. С. 317–323.

## Inclined two-dimensional phase difference ionosphere radiotomography

O.I. Baraboshkin<sup>1,2</sup>, S.V. Trusov<sup>1</sup>, A.A. Romanov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Russian Space Systems, Moscow 111250, Russia*  
*E-mail: baraboshkin.oleg@gmail.com*

<sup>2</sup>*Moscow Institute of Physics and Technology (State University), Dolgoprudny 141700, Russia*

In the technique of two-dimensional radiotomography ionosphere monitoring along chains of stations using signals of low-orbit satellites, the sub-satellite track passes close to the stations, so the geometry of the experiment is flat. This condition severely limits the number of used spans. However, the characteristics of the satellite signal and receivers make it possible to receive signals at satellites with low elevation angles, so using side spans is technically possible. Signals of the satellites, passing back from the receiver chain, carry a lot of potentially valuable information about the state of the ionosphere, but currently they cannot be used or they are used incorrectly in the method of data processing. The problem under consideration in this paper is using side flights of satellites in a classical definition of ionosphere radiotomography. The influence of such geometry of the satellite pass on the initial phase difference data was compared with the flat case. A method of an inclined tomography taking into account the three-dimensionality of the task was proposed. The following problems were considered: simulation of the solution of the inclined tomography; errors estimation, when solving similar to vertical flat case; the effectiveness of this approach.

**Keywords:** ionosphere, radiotomography.

## References

1. Alpatov V.V., Kunitsyn V.E., Lapshin V.B., Romanov A.A., Tsenko S.V., Opyt sozdaniya Roshydrometom seti radiotomographii dlya issledovaniya i monitoringa ionosfery (Experience of creation radiotomography network for ionosphere research and monitoring for Roshydromet), *Geliogeofizicheskie issledovaniya*, No. 2, 2012, pp. 60–71.
2. Kunitsyn V.E., Tereshchenko E.D., Andreeva E.S., *Radiotomographiya ionosfery* (Radiotomography of the ionosphere). Moscow, FIZMATLIT, 2007, 336 p.
3. Trusov S.V., Romanov A.A., Novikov A.V., A.A. Romanov, Informatcionnaya tehnologiya avtomatizirovanoi obrabotki dannyh radiotomographii ionosfery (Information technology of automated ionospheric tomography data processing), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2009, Issue 6, Vol. 2, pp. 317–323.