



УДК 621.371.3(075.8)

## **Оценка пространственных вариаций ионосферного запаздывания сигнала по данным одночастотных приемников спутниковых радионавигационных систем**

В. И. Сажин ([sazhin@physdep.isu.ru](mailto:sazhin@physdep.isu.ru))

В. Е. Унучков ([vlad.unuchkov@yandex.ru](mailto:vlad.unuchkov@yandex.ru))

В. А. Голыгин ([vigol@stlgr.ru](mailto:vigol@stlgr.ru))

Е. М. Вдовин ([zhelos85@mail.ru](mailto:zhelos85@mail.ru))

А. В. Здериглазова ([agniyaz@yandex.ru](mailto:agniyaz@yandex.ru))

**Аннотация.** Для глобальных навигационных спутниковых систем, используемых в геодезии и различных областях наук о Земле, описан способ оценки пространственных вариаций ионосферной погрешности при измерениях псевдодальностей с применением одночастотного приемника. Проведено численное моделирование на упрощенной аналитической модели ионосферы для сопоставления теоретических оценок с данными измерений. Показано, что для устранения случайных колебаний необходимо использовать усреднение данных за период 30–60 мин. В благоприятных условиях вариации ионосферной погрешности могут быть использованы для уточнения часовых изменений параметров ионосферы.

**Ключевые слова:** глобальные навигационные спутниковые системы, псевдодальность, приемник навигационных сигналов, ионосферная погрешность, параметры ионосферы, модель ионосферы, численное моделирование.

### **Введение**

Глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС) GPS и ГЛОНАСС были разработаны для решения широкого круга навигационных задач и в настоящее время все более широко используются в геодезии. В последнее время ГНСС стали активно применяться в науках о Земле как инструмент исследований: например, для наблюдения движения участков земной коры, прогнозирования землетрясений, изучения нижней и верхней атмосферы Земли, влияния метеорологических факторов и антропогенных воздействий. За этот период значительно повысились и требования к точности работы приемников ГНСС, основным источником ошибок в которых является запаздывание сигнала на трассе навигационный спутник (НС) – потребитель, содержащее задержку в тропосфере и ионосфере. Путь сигналов ГНСС через тропосферу на два порядка меньше, чем через ионосферу, и основная часть тропосферной задержки легко прогнозируется с помощью

стандартных атмосферных моделей [12], поэтому ясно, что основной вклад в погрешность измерений вносит ионосфера.

Коррекция ионосферной погрешности навигационных измерений в системах ГЛОНАСС и GPS может быть проведена тремя различными способами: алгоритмическим, основанным на применении дополнительной информации, передаваемой в кадре навигационного сообщения; методом «полусуммы», использующим квазидальномерные и фазовые измерения; двухчастотным, когда выполняется обработка данных с задержке на двух несущих частотах [10].

В системе GPS алгоритмический метод реализован с использованием модели Клобучара [14], которая представляет компромисс между точностью и простотой реализации и официально дает в среднем 50%-ную компенсацию [14], однако в условиях геомагнитных возмущений ее эффективность значительно снижается. Это связано с тем, что данная модель не учитывает нерегулярную составляющую полного электронного содержания (ПЭС) в ионосфере, которая может достигать 50 % от фонового уровня [17]. В статьях [3; 7] описывается определение ионосферной погрешности способом «полусуммы» с использованием кодовых и фазовых измерений только на одной частоте L1, однако применение этого метода на практике осложняется необходимостью устранения фазовой неоднозначности [10]. Наиболее просто и точно компенсация ионосферной погрешности осуществляется двухчастотным методом. Если измерить «кажущуюся», или псевдодальность (ПД) на двух частотах, то эти измерения будут отличаться только на величину ионосферной погрешности и ее можно легко вычислить [11].

В ряде работ рассматривается задача оценки влияния ионосферной задержки сигналов с использованием одночастотного приемника ГНСС [9–11]. В них используются измерения псевдодальности для большого числа НС, и за счет избыточности навигационных данных при постоянном местоположении приемника удастся определить вклад ионосферы в псевдодальность.

В настоящей работе развивается подход, использующий для определения ионосферной погрешности модель ионосферы, корректируемую на текущую ситуацию по оперативно получаемой информации.

### **Определение вклада ионосферной погрешности**

Рассмотрим возможность оценки вклада ионосферы в измерения псевдодальности с помощью одночастотного приемника ГЛОНАСС/GPS [9]. Для этого будем считать, что координаты приемника  $x$ ,  $y$ ,  $z$  неизменны и известны. Точное значение ПД от  $i$ -го навигационного спутника с координатами  $x_b$ ,  $y_b$ ,  $z_b$  определяется как рассчитанная в свободном пространстве дальность  $D'_i = ct'_i$ , где  $c$  – скорость электромагнитной волны в свободном пространстве,  $t'_i$  – время распространения сигнала от данного спутника до приемника. Эта дальность отличается от геометрической дальности (ГД)  $D_i$  на неизвестную величину  $\rho$ :

$$D'_i = D_i + \rho = \left[ (x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2 \right]^{1/2} + \rho. \quad (1)$$

$D'_i$  определяется по разности моментов приема и передачи навигационного сигнала между временными шкалами НС и приемника. Если точность шкалы НС с учетом ее коррекции достаточна для определения момента излучения, то из-за нестабильности шкалы приемника необходимо учитывать ее мгновенный сдвиг относительно шкалы НС на неизвестную величину  $t'$  ( $\rho = ct'$ ).

В реальных условиях результаты измерения ПД  $D''_i$  отличаются от значения  $D'_i$  из формулы (1) из-за влияния на распространение навигационных сигналов различных факторов [10]. Основные ошибки, возникающие при этом, вызваны запаздыванием сигнала в ионосфере  $\delta t_i^{ион}$  и тропосфере  $\delta t_i^{мпон}$ , а также погрешностями определения эфемерид  $\delta D_i^{\phi}$ . Другие ошибки хорошо компенсируются алгоритмами обработки сигналов. Например, влияние многолучевости значительно уменьшается усреднением данных на интервале 30 с и более [8], а релятивистские эффекты устраняются коррекцией навигационного сигнала [10].

Таким образом, ошибка измерения ПД в основном определяется следующими составляющими:

$$\delta D_i = D''_i - D_i - \rho = c(\delta t_i^{ион} + \delta t_i^{мпон}) + \delta D_i^{\phi}. \quad (2)$$

Отсюда можно найти вклад ионосферы в ошибку измерения ПД для  $i$ -го НС:

$$\delta d_i = c\delta t_i^{ион} = D''_i - D_i - \rho - c\delta t_i^{мпон} - \delta D_i^{\phi}. \quad (3)$$

Величина  $\rho$  в выражении (3) зависит от расхождения шкал времени НС и приемника и непредсказуемо меняется в очень широких пределах. При решении навигационной задачи относительно времени шкала приемника может быть привязана к шкале НС, но найденная при этом величина  $\rho$  будет характеризовать эффективное значение с учетом других ошибок определения ПД, и  $\delta d_i$  в этом случае будет иметь смысл отклонения от некоторого среднего значения  $\langle \delta d_i \rangle$  для всех НС, участвующих в навигационном решении [6].

Для устранения влияния нестабильности временной шкалы приемника построим разность ошибок ионосферы для  $i$ -го и  $j$ -го НС в один момент времени:

$$\Delta d_{i,j} = \delta d_i - \delta d_j = D''_i - D''_j - D_i + D_j - c\delta t_i^{мпон} + c\delta t_j^{мпон} - \delta D_i^{\phi} + \delta D_j^{\phi}. \quad (4)$$

Как видно, точность определения  $\Delta d_{i,j}$  зависит от погрешностей определения эфемерид выбранных НС и разностей тропосферных задержек сигналов от них.  $\delta D_i^{\phi}$  обычно составляет единицы метров. Применение постобработки и использование уточненных эфемерид дает погрешность

значительно меньше 1 м. Если предположить, что ошибки для двух НС независимы, то общая ошибка из-за погрешностей задания эфемерид

$$\delta D_{i,j}^{\text{эф}} = \sqrt{(\delta D_i^{\text{эф}})^2 + (\delta D_j^{\text{эф}})^2}.$$

Задержка в тропосфере приводит к ошибке в измерении ПД, которая хорошо компенсируется простыми моделями тропосферы. В нормальных условиях в тропосфере для углов места НС относительно горизонта  $\beta > 5^\circ$  и достижения погрешности после коррекции менее 0,5 м можно воспользоваться формулой:

$$\delta t_i^{\text{трон}} = \frac{\delta t_0^{\text{трон}}}{\sin \beta_i} \quad (5)$$

Здесь  $\delta t_0^{\text{трон}}$  – задержка сигнала в тропосфере для зенитных углов НС, равная  $\sim 7$  нс, что соответствует пути 2,1 м. Для увеличения точности коррекции можно применить модель Саастамойнена [15].

Таким образом, общая величина ошибки определения  $\delta d_{i,j}$  в благоприятных условиях составляет  $\sim 1$ – $2$  м и вариации ионосферной задержки величиной около 10 м и более могут быть определены одночастотным приемником ГНСС.

### Численное моделирование вариаций псевдодальности

Для теоретической оценки вариаций псевдодальности проведено по программе [2] их моделирование на упрощенной однослойной модели электронной концентрации в ионосфере, описываемой функцией Чепмена [5].

$$N(h) = N_{\text{max}} \exp(1 - z - e^{-z}), \quad (6)$$

$$z = \frac{h - h_m}{H_{np}}, \quad (7)$$

где  $N_{\text{max}}$  – электронная концентрация на высоте максимума ионосферы ( $\text{м}^{-3}$ ),  $h$  – текущая высота (км),  $h_m$  – высота  $N_{\text{max}}$  (км),  $H_{np}$  – высота однородной атмосферы (км).

Выполнены расчеты группового пути сигнала для различных значений зенитных углов положения НС  $\alpha$  в ионосфере. Получены значения разности  $\Delta P$  группового пути сигнала и геометрической дальности между НС и наземным пунктом. Полученные значения удовлетворительно соответствуют величинам этой разности, определяемым в ряде измерений [1].

Так, при значении  $N_{\text{max}}$ , соответствующем критической частоте  $f_0$ , равной 8 МГц, и высоте максимума ионосферы 250 км, значения  $\Delta P$  изменяются в диапазоне от нескольких метров до 25 м при изменении  $\alpha$  от 0 до  $90^\circ$ .

В рамках используемой модели нами проведен сравнительный анализ степени влияния вариаций критической частоты при зафиксированном значении высоты максимума, а также вариаций высоты максимума при

фиксированном значении  $f_0$  на изменение  $\Delta P$ . На рисунке 1 представлен график, полученный для НС с  $\alpha = 50^\circ$ ,  $h_m = 250$  км.

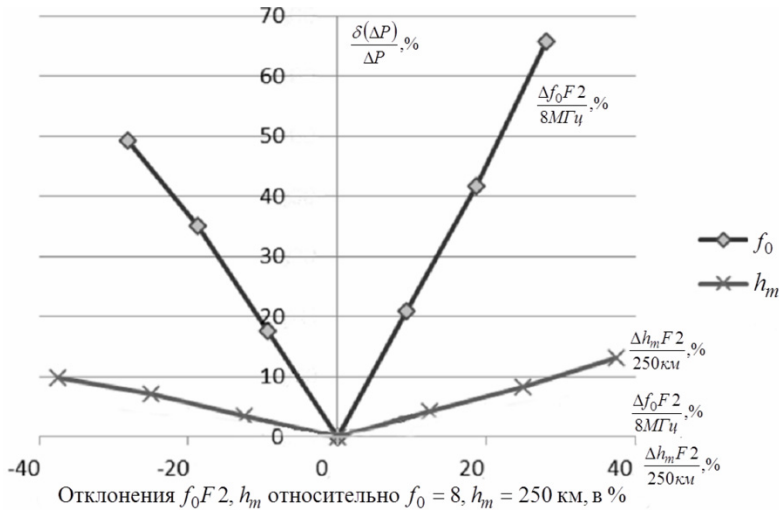


Рис. 1. Вариации относительных изменений величины  $\Delta P - \delta(\Delta P)$  в зависимости от относительных отклонений параметров  $f_0$  и  $h_m$  модели ионосферы (знак « $\leftarrow$ » по оси абсцисс соответствует уменьшению величины параметра)

Можно видеть, что вариации  $f_0$  оказывают наиболее существенное влияние на изменение ПД, значительно превосходящее влияние вариаций  $h_m$ . Такой же вывод получен и для моделирования нескольких других ситуаций с различными значениями параметров модели ионосферы и зенитных углов положения НС. Этот результат может быть использован при разработке методики коррекции модели ионосферы по измерениям псевдодальности.

Проведено также моделирование изменений  $\Delta P$  в зависимости от величины критической частоты ионосферы. На рисунке 2 показан типичный пример полученных изменений  $\Delta P$  для трех значений зенитного угла НС ( $75^\circ$ ;  $50^\circ$  и  $25^\circ$ ) относительно значения  $f_0$ , равного 8 МГц при зафиксированном значении  $h_m = 250$  км.

Видно, что с ростом  $\alpha$  относительные изменения  $\Delta P$  существенно увеличиваются. Так, для угла  $\alpha$ , равного  $75^\circ$  при росте  $f_0$  от 8 МГц на 10 % значение псевдодальности увеличивается примерно на 10 м. В целом рисунок показывает, что в рамках используемой модели изменения псевдодальности при изменении критической частоты ионосферы довольно значительны для низких углов места НС.

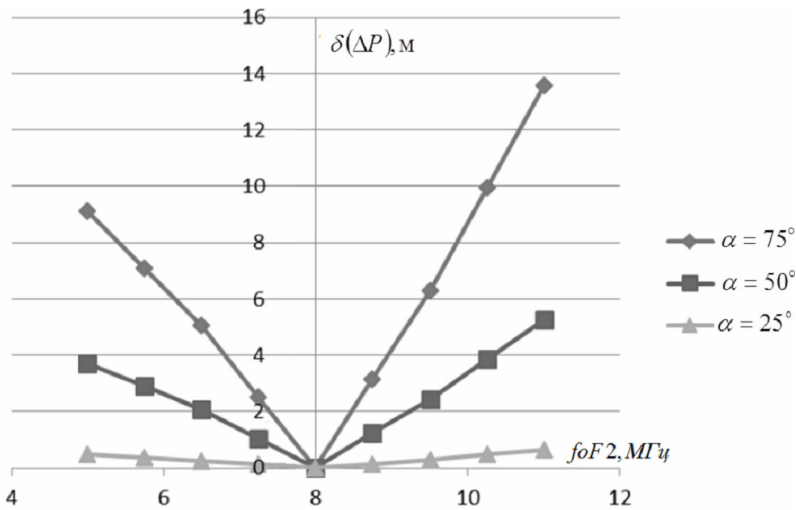


Рис. 2. Вариации абсолютных изменений  $\Delta P$  в зависимости от отклонений критической частоты ионосферы для различных зенитных углов  $\alpha$  при  $h_m = 250$  км

Таким образом, проведенное моделирование демонстрирует, что по результатам измерения псевдодальности на одночастотных приемниках возможна оценка вариаций критической частоты ионосферы в текущей ситуации. Естественно, что результаты моделирования необходимо уточнить, выполнив моделирование для более адекватной модели многослойной ионосферы с горизонтальными градиентами электронной концентрации.

### Результаты измерений

Для проверки описанного алгоритма определения вариаций ионосферы была проведена обработка сеанса измерения сигналов от нескольких НС GPS 19 января 2013 г., длительностью около 5 ч. Для измерений использовался 20-канальный одночастотный приемник BU-353 фирмы GlobalSat. Этот приемник предназначен для приема сигналов ГНСС GPS, работает на частоте L1 по C/A-коду и имеет высокую чувствительность – 159 дБм. При наблюдениях применялась программа SirfTech версии 2.20 [16], записывающая данные приемника в бинарном формате в файл. Для представления бинарных данных в стандартном виде применялась программа Sirfrin1, которая выдает группу файлов в соответствии со спецификацией RINEX [4]. Для основной обработки и сортировки данных нами была разработана программа TestClassRinexPr.exe на языке Дельфи, которая позволяет выполнять вычисления по формулам (1)–(3) и сортирует псевдодальности по каждому НС, что упрощает дальнейшую обработку.

На рисунке 3 показан пример измерения навигационных сигналов, принимаемых с НС GPS1 и GPS20.

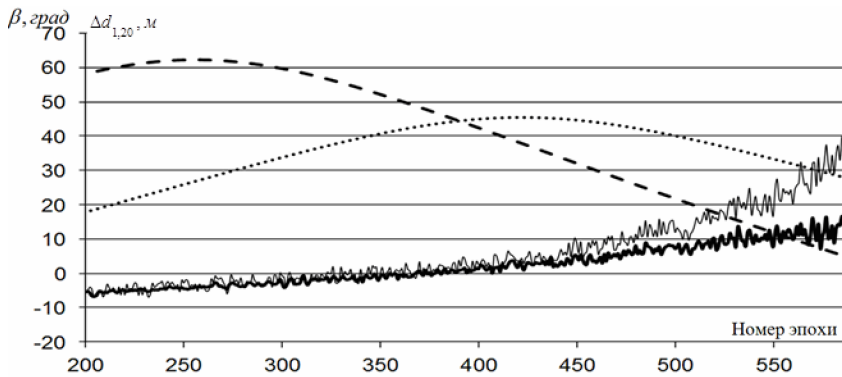


Рис. 3. Пример измерений разности ионосферных ошибок для двух НС

На рисунке по горизонтали отложены номера 30-секундных интервалов (эпох) от 0 ч всемирного времени. В верхней части рисунка даны результаты вычислений углов места  $\beta$  НС GPS1 (пунктир) и GPS20 (точки). В нижней части рисунка тонкой линией в соответствии с выражением (4) показана разность измеренных псевдодальностей за вычетом разности ГД от этих НС с коррекцией запаздывания лучей в тропосфере по формуле (5). Для расчета ГД использовались уточненные эфемериды. Здесь же для сравнения жирной линией приведена разность ионосферных ошибок для этих же НС, полученная двухчастотным методом приемником JPS EGGDT станции Иркутск (IRKL). Можно отметить, что данные о разностях ионосферных ошибок для двух НС, полученные двумя способами, при углах места НС более  $25^\circ$  хорошо совпадают, различие между ними в 90 % случаев не превышает 2 м (7 нс) при регулярном ходе около 20 м (70 нс). При приближении НС к горизонту данные одночастотного приемника начинают сильно отличаться от полученных двухчастотным методом, и при углах места около  $5^\circ$  различие доходит до 15–20 м ( $\sim 60$  нс). Вероятно, это связано с влиянием тропосферы.

На рисунке 4 показана средняя часть рис. 3 для детального сравнения данных о вариациях ионосферной ошибки.

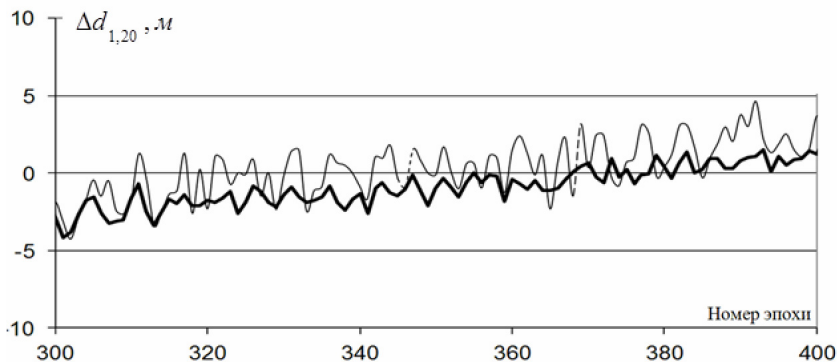


Рис. 4. Сравнение данных одночастотного и двухчастотного приемников

Видно, что случайные отклонения разности ионосферных ошибок, определенные по данным одночастотного приемника, примерно в два раза больше, чем полученные для двухчастотного метода.

## Выводы

Описанный в статье способ оценки пространственных вариаций ионосферных ошибок измерений дальностей от НС с применением одночастотного приемника может быть использован для получения оперативных данных по изменению параметров ионосферы в текущей ситуации. Теоретические оценки вариаций псевдодальности, полученные при численном моделировании на упрощенной модели ионосферы, показывают определяющее влияние на изменения псевдодальности изменений критической частоты ионосферы в области пересечения траекторией сигнала максимума ионосферы. Для низких углов места НС вариации ПД при изменениях  $f_0$  на 10 % могут достигать 10 м. Полученные результаты моделирования требуют уточнения для модели ионосферы более адекватной реальности.

Как видно из результатов выполненного эксперимента и проведенного анализа ошибок измерений, в благоприятных условиях пространственные вариации ионосферной погрешности могут быть определены с точностью, сравнимой с точностью, достигаемой двухчастотным методом. Случайные колебания вариаций по данным одночастотного приемника имеют характерное время порядка 1–5 мин, и для их устранения необходимо использовать усреднение данных за период 30–60 мин. Это позволит оценивать часовые изменения параметров ионосферы. Такой период усреднения также существенно снизит ошибки из-за многолучевости для плохих условий приема и влияние шумов при обработке сигналов НС.

Полученные результаты могут быть использованы для совершенствования методик применения ГНСС в геодезии и различных областях наук о Земле.

*Работа выполнена при поддержке Программы стратегического развития ИГУ на 2012–2016 годы (P212-ОУ-033).*

## Список литературы

1. Афраймович Э. Л. GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли / Э. Л. Афраймович, Н. П. Первалова. – Иркутск : ГУ НЦ ВСНЦ СО РАН, 2006. – 480 с.
2. Вдовин Е. М. Вариации группового пути сигнала в глобальной навигационной спутниковой системе / Е. М. Вдовин, В. А. Голыгин, В. И. Сажин // Международная Байкальская молодежная научная школа по фундаментальной физике «Взаимодействие полей и излучения с веществом» : материалы докл. XIII конф. мол. ученых. 9–14 сент. 2013 г. – Иркутск : Изд-во НСФ СО РАН, 2013. – С. 227–229.
3. Горбачев О. А. О диагностике ионосферы с использованием одночастотных приемников GPS / О. А. Горбачев, В. Б. Иванов, П. В. Рябков // Физические процессы в космосе и околоземной среде : материалы Междунар. Байкал. молодеж. науч. шк. по фундамент. физике (БШФФ-2006). – Иркутск, 2006. – С. 159–163.



4. Гуртнер Вернер. RINEX. Аппаратно-независимый формат обмена навигационными данными. Версия 2.11 / Вернер Гуртнер. – Университет Берна, 2007. – 42 с.
5. Дэвис К. Радиоволны в ионосфере / К. Дэвис. – М. : Мир, 1973. – 504 с.
6. Здериглазова А. В. Оценка ионосферной погрешности определения псевдодальности по данным одночастотных приемников спутниковых радионавигационных систем / А. В. Здериглазова, В. Е. Унучков // Транспортная инфраструктура сибирского региона : материалы IV всерос. конф. с междунар. участием. – Иркутск : Изд-во ИрГУПС, 2013. – Т. 1. – С. 342–349.
7. Казанцев М. Ю. Определение ионосферной погрешности измерения псевдодальностей в одночастотной аппаратуре систем ГЛОНАСС и GPS [Электронный ресурс] / М. Ю. Казанцев, Ю. Л. Фатеев // Журн. радиоэлектроники. – 2002. – № 12. – URL: <http://jre.cplire.ru/jre/dec02/6/text.html>.
8. Михайлов С. В. Влияние многолучевости распространения радиоволн от навигационного космического аппарата на точность определения координат GPS-приемником // Беспроводные технологии. – 2006. – № 2. – С. 60–71.
9. Новиков А. В. Оценка ионосферной задержки с помощью одночастотных приемников ГНСС / А. В. Новиков, А. А. Романов // Актуальные проблемы ракетно-космического приборостроения и информационных технологий : сб. ст. – М. : Новые технологии. – 2008. – № 5. – С. 22–25.
10. Сетевые спутниковые радионавигационные системы / В. С. Шебшаевич [и др.] ; под ред. В. С. Шебшаевича. – М. : Радио и связь, 1993 – 408 с.
11. Пат. 2313103 Рос. Федерация, МПК G01S1/32. Способ одночастотного определения задержки сигналов навигационной спутниковой системы в ионосфере / И. Н. Сушкин ; заявитель и патентообладатель Краснояр. гос. техн. ун-т (КГТУ) – № 2006120208/09; заявл. 08.06.2006 ; опубли. ..., Бюл. №... – [? с.]
12. Grewal M. S. Global Positioning Systems, Inertial Navigation, and Integration / M. S. Grewal, L. R. Weill, A. P. Andrews. – N. Y. : Wiley, 2007. – 554 p.
13. International Reference Ionosphere [Electronic resource]. – URL: <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/space/model/ionos/iri.html>.
14. Klobuchar J. A. Ionospheric time-delay algorithm for single-frequency GPS users // IEEE Transactions on Aerospace and Electronics System. – 1987. – Vol. 23, N 3. – P. 325–331. – doi:10.1109/TAES.1987.310829.
15. Saastamoinen J. Atmospheric correction for the troposphere and stratosphere in radio of ranging satellites // Geophysical Monograph Series. – 1972. – Vol. 15. – P. 247–251.
16. SirfTech [Electronic resource]. – URL: <http://w5.nuinternet.com>.
17. Warnart R. The study of the TEC and ITS irregularities using a regional network of GPS stations // IGS worksh. Proc, 1995.

## **Evaluation of the Spatial Variations of the Ionospheric Delay of Signal Based on Data of Single Frequency Receivers of Navigation Satellite Systems**

V. I. Sazhin, V. E. Unuchkov, V. A. Golygin, E. M. Vdovin,  
A.V. Zderiglazova

**Abstract.** A method for evaluation of spatial variations of ionospheric error in geodetic measurements is described for a global navigation satellite systems used in a geodesy and the Earth Sciences. A numerical modeling based on a simplified analytical model of the ionosphere is simulated for comparison with theoretical estimates of the measurement data. It is shown that the average data for the period of 30–60 minutes is necessary to use for the elimination of random vibrations. In favorable conditions, the variation of the ionospheric error can be used to verify the time changes in the parameters of the ionosphere.

**Keywords:** global navigation satellite systems, pseudorange, receiver of navigation signals, ionospheric error, ionosphere parameters, ionosphere model, numerical modeling.

*Сажин Виктор Иванович*  
доктор физико-математических наук  
заведующий кафедрой  
Иркутский государственный университет  
664003, г. Иркутск, ул. К. Маркса, 1  
тел.: (3952) 52-12-68

*Sazhin Viktor Ivanovich*  
Doctor of Sciences (Physics and  
Mathematics), Head of Department  
Irkutsk State University  
1, K. Marx st., Irkutsk, 664003  
tel.: (3952) 52-12-68

*Унучков Владимир Евгеньевич*  
кандидат физико-математических наук  
доцент  
Иркутский государственный университет  
664003, г. Иркутск, ул. К. Маркса, 1  
тел.: (3952) 52-12-68

*Unuchkov Vladimir Evgenievich*  
Candidate of Sciences (Physics and  
Mathematics), Associate Professor  
Irkutsk State University  
1, K. Marx st., Irkutsk, 664003  
tel.: (3952) 52-12-68

*Голыгин Виктор Александрович*  
кандидат физико-математических наук  
младший научный сотрудник  
Иркутский государственный университет  
664003, г. Иркутск, ул. К. Маркса, 1  
тел.: (3952) 52-12-68

*Golygin Victor Aleksandrovich*  
Candidate of Sciences (Physics and  
Mathematics), Junior Research Scientist  
Irkutsk State University  
1, K. Marx st., Irkutsk, 664003  
tel.: (3952) 52-12-68

*Вдовин Евгений Михайлович*  
младший научный сотрудник  
Иркутский государственный университет  
664003, г. Иркутск, ул. К. Маркса, 1  
тел.: (3952) 52-12-68

*Vdovin Eugene Mikhailovich*  
Junior Research Scientist  
Irkutsk State University  
1, K. Marx st., Irkutsk, 664003  
tel.: (3952) 52-12-68

*Здериглазова Агния Владимировна*  
Аспирант  
Иркутский государственный университет  
путей сообщения  
664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15  
тел.: (3952) 63-83-10

*Zderiglazova Agniya Vladimirovna*  
Postgraduate  
Irkutsk State Transport University  
15, Chernishevsky st., Irkutsk, 664074  
tel.: (3952) 63-83-10