

УДК 621.371.3: 621.396.96

А.Ф. Чипига, В.П. Пашинцев, М.В. Песков

## Оценка интенсивности ионосферных мерцаний и помехоустойчивости систем спутниковой связи по результатам измерения полного электронного содержания

На основе результатов измерений вариаций полного электронного содержания ионосферы, соответствующих мелкомасштабным возмущениям, вычислены значения индекса мерцаний и вероятности ошибки при приеме информационных символов на частотах  $L1$  и  $L2$  системы GPS. Показано, что при средних значениях индекса мерцаний  $S4 \leq 1$  величина вероятности ошибки  $P_{\text{ош}}$  не превышает  $10^{-8}$ . Рост значения индекса мерцаний  $S4$  в среднем в два раза приводит к возрастанию вероятности ошибки  $P_{\text{ош}}$  на три порядка и превышает  $10^{-6}$ , что подтверждает существенное влияние мелкомасштабных ионосферных возмущений на помехоустойчивость низкочастотных систем спутниковой связи.

**Ключевые слова:** система спутниковой связи, ионосферные мерцания, помехоустойчивость, вероятность ошибки, индекс мерцания, мелкомасштабные ионосферные возмущения.

doi: 10.21293/1818-0442-2018-21-4-1-22-25

Известно [1–4], что процесс распространения радиоволн через мелкомасштабные (т.е. с характерными размерами  $10 \dots 10^3$  м) ионосферные неоднородности сопровождается возникновением замираний (мерцаний) принимаемого сигнала, которые значительно снижают помехоустойчивость систем спутниковой связи (ССС).

Основной характеристикой, позволяющей оценить помехоустойчивость ССС, является вероятность ошибки  $P_{\text{ош}}$  при приеме информационных символов [1, 2]. Для оценки интенсивности ионосферных мерцаний широко используется индекс  $S4$  [4]. Существует возможность определения величины вероятности ошибки  $P_{\text{ош}}$  и индекса мерцаний  $S4$  на основе измерения вариаций полного электронного содержания (ПЭС)  $\Delta N_{TМ}$ , соответствующих мелкомасштабным ионосферным возмущениям, с помощью двухчастотного приемника спутниковой радионавигационной системы (СРНС) (GPS и ГЛОНАСС). ПЭС характеризует полное количество электронов в столбе сечением  $1 \text{ м}^2$  вдоль вертикального пути распространения радиоволн [1, 3].

Целью работы является оценка индекса мерцаний  $S4$  и вероятности ошибки  $P_{\text{ош}}$  при приеме информационных символов по результатам измерения полного электронного содержания с помощью двухчастотного приемника GPS/ГЛОНАСС.

Исходными данными для определения характеристик помехоустойчивости ССС и ионосферных мерцаний является временной ряд вариаций ПЭС  $\Delta N_{TМ}(t)$ , соответствующих мелкомасштабным ионосферным возмущениям. Пример ряда  $\Delta N_{TМ}(t)$ , полученного на основе измерений двухчастотного приемника NovAtel GPStation-6, представлен на рис. 1.

Из рис. 1 видно, что в условиях умеренных ионосферных возмущений величина среднеквадратического отклонения (СКО) ПЭС  $\sigma_{\Delta N_{TМ}}$  в среднем

составляет 0,03 TECU (Total Electron Content Unit – единица измерения ПЭС, равная  $10^{16}$  эл/м<sup>2</sup>). В условиях слабых возмущений величина  $\sigma_{\Delta N_{TМ}}$  не превышает 0,01 TECU.

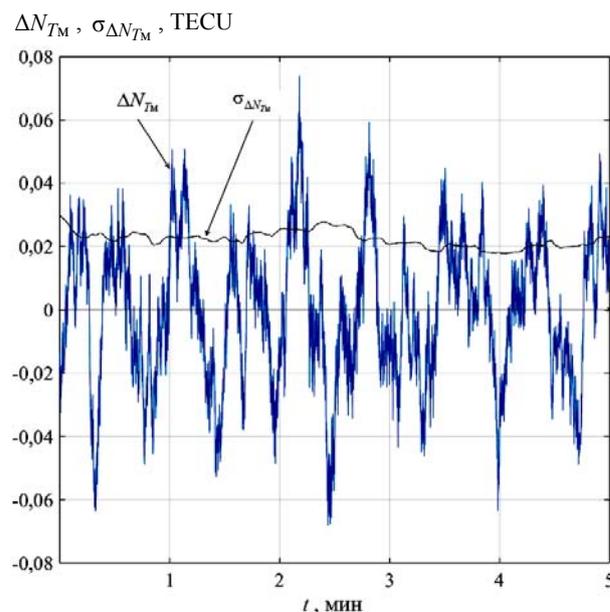


Рис. 1. Ряд вариаций полного электронного содержания, соответствующих мелкомасштабным ионосферным возмущениям в умеренно возмущенной ионосфере

Часто возникновение ионосферных мерцаний сигналов считают результатом дифракции электромагнитных волн на мелкомасштабных неоднородностях ионосферы. Для описания процесса распространения радиоволн через неоднородную ионосферу используется метод фазового экрана, устанавливающий зависимость СКО флуктуаций фазового фронта волны на выходе неоднородной ионосферы  $\sigma_{\varphi}$  от СКО флуктуаций ПЭС  $\sigma_{\Delta N_{TМ}}$  [1]. Таким образом, на основе ряда  $\sigma_{\Delta N_{TМ}}(t)$  (рис. 1) можно получить ряд  $\sigma_{\varphi}(t)$  [1, 2]:

$$\sigma_{\varphi}(t) = 80,8\pi\sigma_{\Delta N_{TM}}(t)/cf, \quad (1)$$

где  $c$  – скорость света,  $f$  – несущая частота.

Временной ряд  $\sigma_{\varphi}(t)$  вариаций СКО флуктуаций фазового фронта волны на выходе неоднородной ионосферы, рассчитанный для частот  $L1$  ( $f=1575,42$  МГц) и  $L2$  ( $f=1227,60$  МГц) системы GPS, представлен на рис. 2.

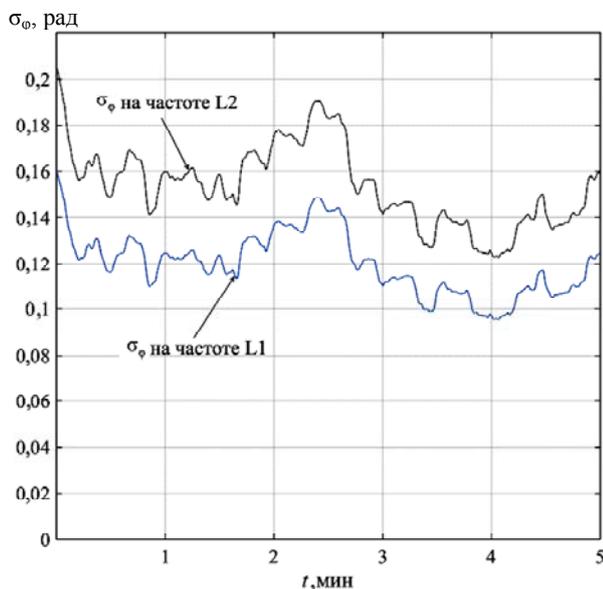


Рис. 2. Ряды вариаций среднев квадратичного отклонения флуктуаций фазового фронта волны на выходе неоднородной ионосферы в умеренно возмущенной ионосфере

Используя результат вычисления  $\sigma_{\varphi}(t)$ , можно вычислить мгновенное значение индекса мерцаний  $S4(t)$  (в приближении дальней зоны) по формуле [5, 6]

$$S4(t) = \sqrt{1 - \exp[-2(\sigma_{\varphi}(t))^2]}. \quad (2)$$

Полученный временной ряд вариаций индекса мерцаний  $S4(t)$  для частот  $L1$  и  $L2$  системы GPS представлен на рис. 3.

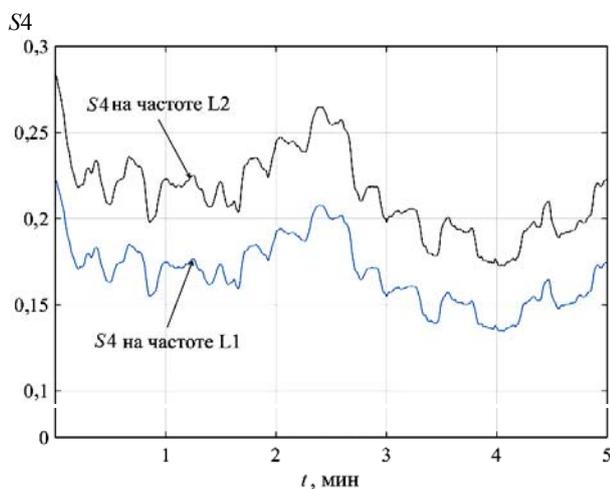


Рис. 3. Ряды вариаций индекса мерцаний  $S4$  в умеренно возмущенной ионосфере

Кроме того, на основе данных об СКО флуктуаций фазового фронта волны  $\sigma_{\varphi}(t)$  можно вычислить коэффициент глубины замираний  $\gamma^2(t)$  (параметр Райса) [1, 2, 7–10]

$$\gamma^2(t) = \frac{\exp[-(\sigma_{\varphi}(t))^2]}{1 - \exp[-(\sigma_{\varphi}(t))^2]}. \quad (3)$$

Полученный ряд вариаций коэффициента глубины замираний  $\gamma^2(t)$  для частот  $L1$  и  $L2$  системы GPS представлен на рис. 4.

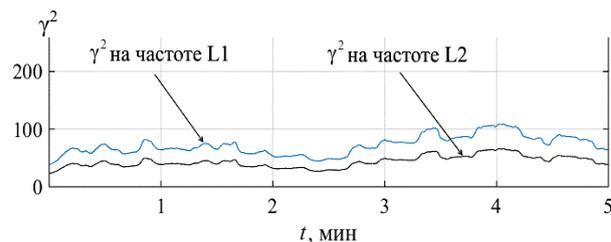


Рис. 4. Ряды вариаций коэффициента глубины замираний  $\gamma^2(t)$  (параметра Райса) в умеренно возмущенной ионосфере

Вероятность ошибки  $P_{\text{ош}}$  при приеме информационных символов в момент времени  $t$  для схемы некогерентного приема вычисляется по формуле [1, 2, 11]

$$P_{\text{ош}}(t) = \frac{\gamma^2(t)+1}{\langle h^2(t) \rangle + 2(\gamma^2(t)+1)} \left[ \frac{\gamma^2(t)\langle h^2(t) \rangle}{\langle h^2(t) \rangle + 2(\gamma^2(t)+1)} \right], \quad (4)$$

где  $\langle h^2(t) \rangle$  – величина среднего энергетического отношения сигнал/шум на входе приемника.

Результаты измерения величины энергетического отношения сигнал/шум  $h^2(t)$  для частот  $L1$  и  $L2$  системы GPS с помощью приемника NovAtel GPStation-6, а также результаты определения соответствующих значений  $\langle h^2(t) \rangle$  представлены на рис. 5 [12–16].

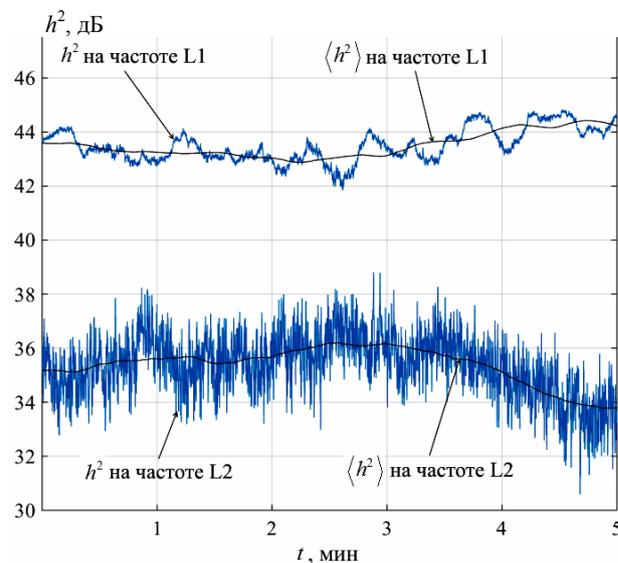


Рис. 5. Ряды вариаций энергетического отношения сигнал/шум  $h^2(t)$  и  $\langle h^2(t) \rangle$  в умеренно возмущенной ионосфере

Используя результаты измерения величины среднего энергетического отношения сигнал/шум  $\langle h^2(t) \rangle$  (см. рис. 5) и коэффициента глубины замираний  $\gamma^2(t)$  (см. рис. 4), получены временные ряды значений вероятности ошибки  $P_{\text{ош}}(t)$  при приеме информационных символов на частотах L1 и L2 системы GPS. Результат представлен на рис. 6.

Таким образом, на основе результатов измерений (см. рис. 1) вариаций ПЭС  $\Delta N_{TМ}(t)$ , соответствующих мелкомасштабным ионосферным возмущениям, вычислены значения индекса мерцаний  $S4(t)$  (см. рис. 3) и вероятности ошибки  $P_{\text{ош}}(t)$  при приеме информационных символов (см. рис. 6) на частотах L1 и L2 системы GPS.

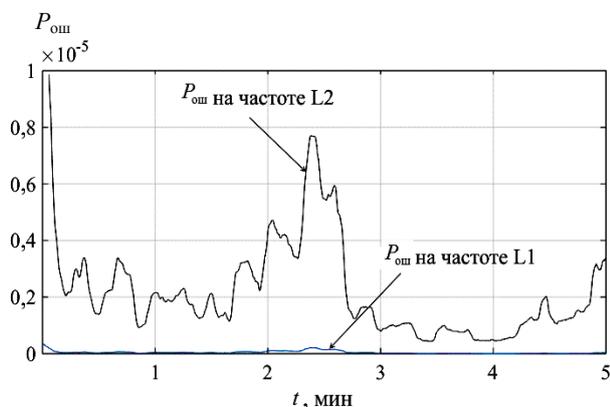


Рис. 6. Ряды значений вероятности ошибки  $P_{\text{ош}}(t)$  при приеме информационных символов на частотах L1 и L2 системы GPS в умеренно возмущенной ионосфере

Из рис. 3 и 6 видно, что при возрастании значения индекса мерцаний до  $S4 \approx 0,25$  (см. рис. 3) в среднем в два раза по сравнению со слабо возмущенными условиями (когда  $S4 \approx 0,1$ ) величина вероятности ошибки  $P_{\text{ош}}$  может превышать  $10^{-6}$  (см. рис. 6), т.е. возрастать на 3 порядка по сравнению с невозмущенными условиями (когда  $P_{\text{ош}} < 10^{-8}$ ). Это подтверждает существенное влияние мелкомасштабных ионосферных возмущений на помехоустойчивость ССС.

Работа выполнена при поддержке РФФИ в рамках проекта № 18-07-01020.

#### Литература

1. Маслов О.Н. Модели трансionoсферных радиоканалов и помехоустойчивость систем космической связи / О.Н. Маслов, В.П. Пашинцев // Приложение к журналу «Инфокоммуникационные технологии». – Вып. 4. – Самара: ПГАТИ, 2006. – 357 с.
2. Пашинцев В.П. Влияние ионосферы на характеристики космических систем передачи информации / В.П. Пашинцев, М.Э. Солчатов, Р.П. Гахов. – М.: Физматлит, 2006. – 184 с.
3. Дэвис К. Радиоволны в ионосфере. – М.: Мир, 1973. – 504 с.
4. Контроль текущих условий распространения сигналов навигационных спутников / В.В. Демьянов,

Ю.В. Ясюкевич, Ш. Дзин // Солнечно-земная физика. – 2013. – № 22. – С. 35–40.

5. Рытов С.М. Введение в статистическую радиофизику. – Ч. 2: Случайные поля / С.М. Рытов, Ю.А. Кравцов, В.И. Татарский. – М.: Наука, 1978. – 463 с.

6. Ааронс Дж. Глобальная морфология ионосферных мерцаний // ТИИЭР. – 1982. – Т. 70, № 4. – С. 4–66.

7. Чипига А.Ф. Энергетическая скрытность низкочастотных систем спутниковой связи от обнаружения сигналов / А.Ф. Чипига, В.П. Пашинцев, А.В. Ляхов, И.В. Анзин // Специальная техника. – 2017. – № 3. – С. 10–18.

8. Чипига А.Ф. Анализ влияния поглощения радиоволн в ионосфере на энергетическую скрытность систем спутниковой связи / А.Ф. Чипига, И.В. Анзин // Студенческая наука для развития информационного общества: Сб. матер. V Всерос. науч.-техн. конф. – Ставрополь: СКФУ, 2016. – С. 18–22.

9. Chipiga A.F. Procedure for calculating the dependence of the energy concealment factor on carrier frequency selection for low-frequency satellite communications system / A.F. Chipiga, V.P. Pashintsev, V.A. Tsybmal, S.N. Shimanov // Automatic Control and Computer Sciences. – 2016. – Vol. 10, №6. – P. 408–414.

10. Пашинцев В.П. Комплекс определения области ионосферы с мелкомасштабными неоднородностями по данным GPS-мониторинга / В.П. Пашинцев, А.Ф. Чипига, В.А. Цимбал, М.В. Песков // Изв. Самар. Науч. центра Российской академии наук. Социальные, гуманитарные, медико-биологические науки. – 2016. – Т. 18, № 2. – С. 941–945.

11. Шевченко В.А. Прогнозирование помехоустойчивости спутниковой связи по результатам мониторинга индекса мерцаний ионосферы / В.А. Шевченко, А.Ф. Чипига, В.П. Пашинцев, К.И. Топорков // Инфокоммуникационные технологии. – 2015. – Т. 13, № 4. – С. 365–375.

12. Чипига А.Ф. Влияние упакованных форматов протоколов измерений на скорость обработки данных в адаптивных системах спутниковой связи / А.Ф. Чипига, Д.М. Марков, Г.В. Слюсарев // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 11. – 759 с.

13. Чипига А.Ф. Шумовая погрешность определения псевдодалности в спутниковой радионавигационной системе при возмущениях ионосферы / А.Ф. Чипига, Г.В. Слюсарев // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 12-2. – С. 263–268.

14. Чипига А.Ф. Анализ энергетической скрытности низкочастотных систем спутниковой связи от обнаружения сигналов // Изв. ЮФУ. Технические науки – 2014. – № 2 (151). – С. 209–217.

15. Чипига А.Ф. Повышение энергетической скрытности систем спутниковой связи при близком размещении приемника радиоперехвата / А.Ф. Чипига, В.П. Пашинцев // Нелинейный мир. – 2013. – Т. 11, № 9. – С. 659–671.

16. Чипига А.Ф. Оценка интервала пространственной корреляции замираний в трансionoсферном канале связи / А.Ф. Чипига, Э.Х. Дагаев // Теория и техника радиосвязи. – 2013. – № 1. – С. 112.

#### Чипига Александр Федорович

Канд. техн. наук, профессор, зав. каф. информационной безопасности автоматизированных систем (ИБАС) Северо-Кавказского федерального университета (СКФУ) Кулакова пр-т, д. 2, г. Ставрополь, Россия, 355009  
Тел.: +7-962-400-76-63  
Эл. почта: chipiga.alexander@gmail.com

**Пашинцев Владимир Петрович**

Д-р техн. наук, профессор каф. ИБАС СКФУ  
Кулакова пр-т., д. 2, г. Ставрополь, Россия, 355009  
Тел.: +7-918-741-33-16  
Эл. почта: pashintsevp@mail.ru

**Песков Марк Владимирович**

Ст. преп. каф. ИБАС СКФУ  
Кулакова пр-т., д. 2, г. Ставрополь, Россия, 355009  
Тел.: +7-928-325-37-68  
Эл. почта: mvpeskov@hotmail.com

Chipiga A.F., Pashintsev V.P., Peskov M.V

**Satellite communication system noise immunity and ionospheric scintillation intensity evaluation based on the results of total electronic content measurements**

Based on the results of total ionosphere electronic content variations measurements that correspond to small-scale fluctuations, the values for scintillation index and for error probability during the reception of the informational symbols on the frequencies L1 and L2 of the GPS system have been obtained. It has been shown that with the average scintillation index values  $S4 \leq 1$ , the error probability value  $P_{err}$  does not exceed  $10^{-8}$ . On an average, doubling of the scintillation index value  $S4$  leads to an increase in the error probability value  $P_{err}$  by three orders and exceeds  $10^{-6}$ , which confirms a significant impact of small-scale ionospheric fluctuations on the satellite communication system noise immunity.

**Keywords:** satellite communication system, ionospheric scintillation, noise immunity, error probability, scintillation index, small-scale ionospheric fluctuations.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2018-21-4-1-22-25

*References*

1. Maslov O.N., Pashintsev V.P. Transionospheric radio channel models and satellite communication systems noise immunity. *Application for the journal «Infocommunication technologies»*, ed. 4, 2006, 357 p. (in Russ.)
2. Pashintsev V.P., Solchatov M.E., Gahov R.P. *Influence of ionosphere on characteristics of satellite information transmission system*. Moscow, 2006, 184 p. (in Russ.)
3. Davies K. *Ionospheric radio propagation*, Moscow, 1973, 504 p. (in Russ.)
4. Demyanov V.V., Yasukevich U.V., Dzin S. Control of current conditions for navigational satellites signal propagation. *Solnechno-zemnaya fizika*, 2013, no. 22, pp. 35–40 (in Russ.)
5. Rytov S.M., Kravtsov U.A., Tatarskiy V.I. *Introduction to statistical radiophysics. Part 2. Random fields*, Moscow, 1978, 463 p. (in Russ.)
6. Aarons J. Global Morphology of Ionospheric Scintillations. *TIIEP*, 1982, Vol. 70, no. 4, pp. 45–66. (in Russ.)
7. Chipiga A.F., Pashintsev V.P., Lyahov A.V., Anzin I.V. Low frequency satellite communication systems energetic concealment and signal detection. *Spetsialnaya tehnika*, 2017, no. 3, pp. 10–18 (in Russ.)
8. Chipiga A.F., Anzin I.V. Analysis of radio waves ionospheric absorption impact on energetic concealment of satellite communication systems. *Studencheskaya nauka dlya razvitiya informatsionnogo obshestva*. Sb. Mater. V Vseros.

nauch.-tehn. Konf., Stavropol, NCFU, 2016, pp. 18–22 (in Russ.)

9. Chipiga A.F., Pashintsev V.P., Tsymbal V.A., Shimanov S.N. Procedure for calculating dependence of energy concealment factor on carrier frequency selection for low-frequency satellite communications system. *Automatic Control and Computer Sciences*, 2016, vol. 50, no. 6, pp. 408–414 (in Russ.)

10. Pashintsev V.P., Chipiga A.F., Tsymbal V.A., Peskov M.V. Complex for determination of ionosphere area with small-scale inhomogeneities based on GPS monitoring data. *Izvestiya Samarского nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk. Sotsialnie, gumanitarnie, mediko-biologicheskie nauki*, 2016, vol. 18, no. 2, pp. 941–945 (in Russ.)

11. Shevchenko V.A., Chipiga A.F., Pashintsev V.P., Toporkov K.I. Forecasting of satellite communication system noise immunity based on results of ionospheric scintillation index monitoring. *Infokommunikatsionnie tehnologii*, 2015, vol. 13, no. 4, pp. 365–375 (in Russ.)

12. Chipiga A.F., Markov D.M., Sluysarev G.V. Impact of packed measurement protocol formats on speed of data processing in adaptive satellite communication systems. *Fundamentalnie issledovaniya*, 2015, no. 11, 759 p. (in Russ.)

13. Chipiga A.F., Sluysarev G.V. Noise-based error of pseudorange determination in satellite radionavigation system with ionospheric fluctuations. *Fundamentalnie issledovaniya*, 2014, no. 12-2, pp. 263–268 (in Russ.)

14. Chipiga A.F. Analysis of low-frequency satellite communication systems energetic concealment and signal detection prevention. *Izvestiya UFU. Tehnicheskie nauki*, 2014, no. 2 (151), pp. 209–217 (in Russ.)

15. Chipiga A.F., Pashintsev V.P. Improving energetic concealment of satellite communication systems with radio intercepting receiver in close proximity. *Nelineyniy mir*, 2013, Vol. 11, no. 9, pp. 659–671 (in Russ.)

16. Chipiga A.F., Dagaev E. H. Evaluation of interval for fading spatial correlation in transionospheric communication channel. *Teoriya i tehnika radiosvyazi*, 2013, no. 1, pp. 112. (in Russ.)

**Alexander F. Chipiga**

Candidate of Engineering, Professor,  
Department of Information Security of Automation Systems (ISAS), North-Caucasus Federal University (NCFU)  
2, Kulakov pr., Stavropol, Russia, 355009  
Phone: +7-962-400-76-63  
Email: chipiga.alexander@gmail.com

**Vladimir P. Pashintsev**

Doctor of Engineering, Professor,  
Department ISAS NCFU  
2, Kulakov pr., Stavropol, Russia, 355009  
Phone: +7-918-741-33-16  
Email: pashintsevp@mail.ru

**Mark V. Peskov**

Senior Teacher, Department ISAS NCFU  
2, Kulakov pr., Stavropol, Russia, 355009  
Phone: +7-928-325-37-68  
Email: mvpeskov@hotmail.com