

УДК 550.388.2

С. А. Черноус, И. И. Шагимурагов, Б. А. Вульфович, Н. В. Калитёнков

Навигация GPS/ГЛОНАСС в Арктике и полярные сияния

Показано соответствие пространственно-временного распределения сияний аврорального овала и пространственно-временных изменений параметров сигнала навигационных спутников. Проанализированы экспериментальные данные о региональных и локальных неоднородностях полного электронного содержания – ПЭС (Total Electron Content – TEC) и данные о задержках сигнала в полярной ионосфере. Использование в качестве индикатора нарушений в работе систем GPS/ГЛОНАСС данных о полярных сияниях может дать возможность значительно повысить точность позиционирования в Арктике с помощью спутниковых навигационных систем (СНС).

Ключевые слова: полярная ионосфера, овал сияний, динамика овала, сигнал навигационных спутников, неоднородности электронного содержания, спутниковые навигационные системы, точность позиционирования.

Введение

В настоящее время навигационные системы являются широко распространенной технологией, в мире существуют миллионы их индивидуальных пользователей и сотни крупных технических и обеспечивающих жизнедеятельность предприятий. Однако в ряде случаев природные катастрофы и вариации космических и атмосферных факторов могут стать причиной проблем приема навигационных сигналов высокоорбитальных спутников. Особенно это касается Арктики, где космическая погода обуславливает влияние полярной ионосферы на трансionoсферное распространение радиосигналов спутниковых систем GPS/ГЛОНАСС (рис. 1). Российские и зарубежные специалисты утверждают, что если анализировать условия распространения и параметры сигнала, то можно предвидеть опасные ситуации, связанные с космической погодой, которые дают ошибку позиционирования порядка 10 и более метров в средних широтах [1]. В Арктике такие отклонения могут быть значительно выше [2–5]. Ученые предупреждают, что солнечно-земные возмущения в ионосфере могут создать серьезные проблемы для аварийно-спасательных служб, которые полагаются на GPS/ГЛОНАСС, для навигационных устройств летательных аппаратов (особенно при взлете и посадке), для наземных диспетчерских навигационных устройств контроля полетов, для судовых навигационных приемников (при лавировании в акваториях портов и установке буровых платформ) и для других служб и потребителей.

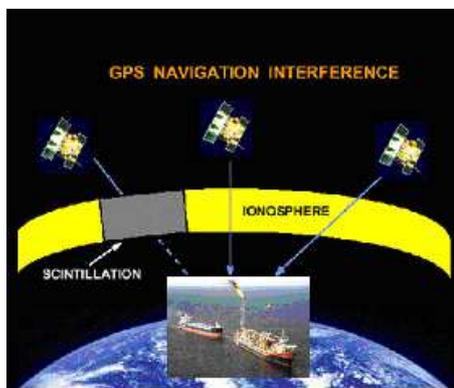


Рис. 1. Схема распространения трансionoсферных навигационных сигналов сквозь полярную ионосферу
Fig. 1. Spreading transionospheric navigation signals through the polar ionosphere



Рис. 2. Овал полярных сияний над северным полушарием согласно изображению NASA
Fig. 2. Aurora oval above the Northern Hemisphere according to NASA image

Поскольку в Арктике авроральные ионосферные возмущения имеют место даже в период минимума солнечной активности, это дает уникальную возможность исследования физических механизмов, обуславливающих нарушения в работе глобальных навигационных систем. Среди причин ошибок позиционирования, включающих собственную погрешность спутниковых измерений, геометрические особенности, погодные условия и стационарные промышленные помехи, большую роль в Арктике играют авроральные ионосферные возмущения. Целью настоящей работы является демонстрация соответствия пространственно-временного распределения сияний аврорального овала и пространственно-временных параметров сигнала навигационных спутников, определяемых региональными и локальными неоднородностями полного электронного содержания – ПЭС, или Total Electron Content – TEC и задержками сигнала в полярной ионосфере. Авторы полагают, что использование в качестве индикатора нарушений в системе GPS/ГЛОНАСС данных о полярных сияниях может значительно повысить точность ее работы.

Материалы и методы

Методы и подходы авторов опираются на факт, что при высыпаниях электронов и протонов в полярную ионосферу основные эмиссии полярных сияний возбуждаются одновременно с ионизацией атомов и молекул верхней атмосферы. Это и приводит к тому, что при высыпаниях электронов и протонов в полярную ионосферу основные эмиссии полярных сияний возбуждаются одновременно с ионизацией атомов и молекул верхней атмосферы. Само увеличение структуризации ионосферы, то есть увеличение как количества, так и интенсивности ионосферных неоднородностей во время полярных сияний обуславливает ухудшение качества приема GPS/ГЛОНАСС сигналов в высоких широтах, что может привести в конечном итоге к ухудшению точности позиционирования, а во время интенсивных магнитосферных возмущений – к невозможности определения местоположения. Это позволяет использовать полярные сияния в качестве диагностического инструмента для оценки вариаций полного электронного содержания (неоднородностей ПЭС) и качества приема навигационных сигналов. Фактически полярная ионосфера представляет собой огромный экран, на котором изображаются в виде полярных сияний геофизические события, происходящие в ближнем космосе. Таким образом, для наших исследований понадобятся измерения параметров принимаемых радиосигналов и параметров пространственно-временного распределения оптических полярных сияний. Полярные сияния "висят" над Землей в северном и южном полушариях в виде овалов (рис. 2), открытых советскими учеными [6; 7] и отражающих области вторжения частиц из магнитосферы в ионосферу. Планетарная картина овала может быть получена как с помощью сети оптических камер с полным обзором неба (рис. 3), так и с помощью высоко-апогейных спутников, оснащенных оптической аппаратурой [8]. Таким образом, авроральный овал представляет собой мгновенную картину распределения полярных сияний над Землей на высотах более 100 км.

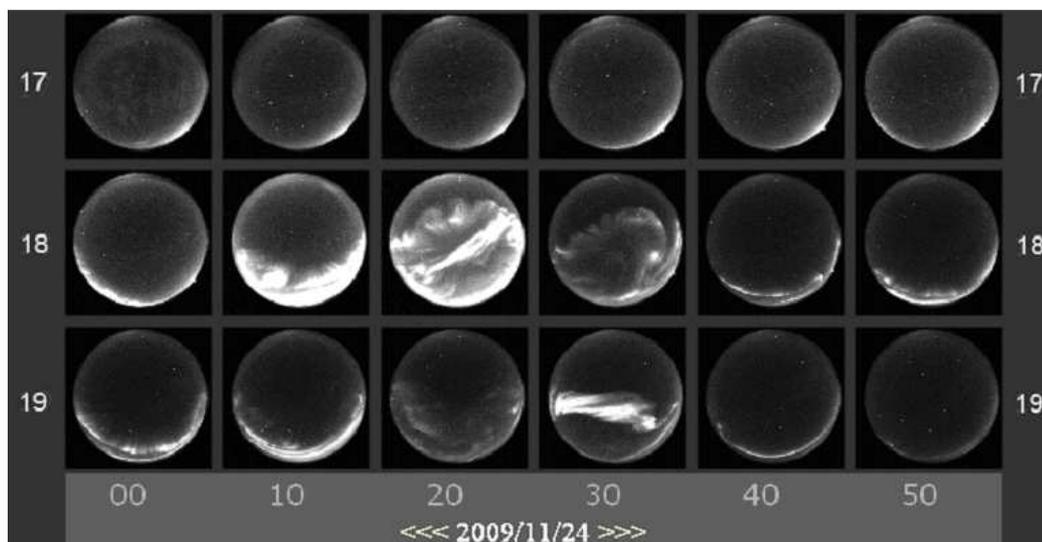


Рис. 3. Снимки полярных сияний в зените оптической камерой полного обзора неба на станции ПГИ в Баренцбурге с разрешением 10 минут. Время мировое. Север в верхней части снимка
Fig. 3. The images of auroras at the zenith of the optical camera of the sky full review on the PGI station in Barentsburg with a resolution of 10 minutes. UT. North – at the top of the picture

Карты неоднородностей в ионосфере строились по методике, описанной в [4] на основании прямых измерений навигационного сигнала на станциях ПГИ и ЗО ИЗМИРАН, а также по данным сети станций GPS (RINEX файлы). Стандартные, с 30-секундным интервалом, двухчастотные GPS/GLONASS измерения обработаны для получения информации о проявлении ПЭС флуктуаций во время бури. В качестве исходных данных служили измерения ПЭС вдоль индивидуальных пролетов спутников над станцией наблюдения. Флуктуационная активность оценивалась по скорости изменения TEC – Rate of TEC (ROT) на 1-минутном интервале. Единица измерения ROT – TECU/min, 1 TECU = 10^{16} электрон/м². В качестве меры интенсивности флуктуаций был использован индекс ROTI.

Результаты и обсуждение

Авторами проанализированы десятки событий, демонстрирующих влияние гелиогеофизических возмущений как на прием навигационных сигналов отдельных спутников, принимаемых в отдельных точках, так и в целом по полярным регионам. Общим обнаруженным явлением оказались рост погрешности позиционирования и нарушение целостности системы в условиях, когда полярные сияния полностью охватывают диаграмму направленности навигационного приемника. На рис. 4, 5 приводятся иллюстрации такого события, зарегистрированного на станции ПГИ на Шпицбергене 24 ноября 2009 г. В 18.10 UT

(сияния у южного горизонта) сигналы спутника G17 принимаются стабильно, ПЭС не испытывает вариаций, в то время как в 18.20 UT (сияния полностью охватывают поле зрения приемника) ПЭС резко возрастает и вообще не может быть зарегистрировано. То же самое происходит с сигналами других спутников системы, что приводит к росту погрешностей позиционирования, появлению сцинтилляций и нарушению целостности системы. Возможность предупредить пользователей о таком развитии событий тесно связана с угловым положением высокоорбитальных спутников GPS/ГЛОНАСС во время развития событий в ионосфере, приведенных на рис. 4.

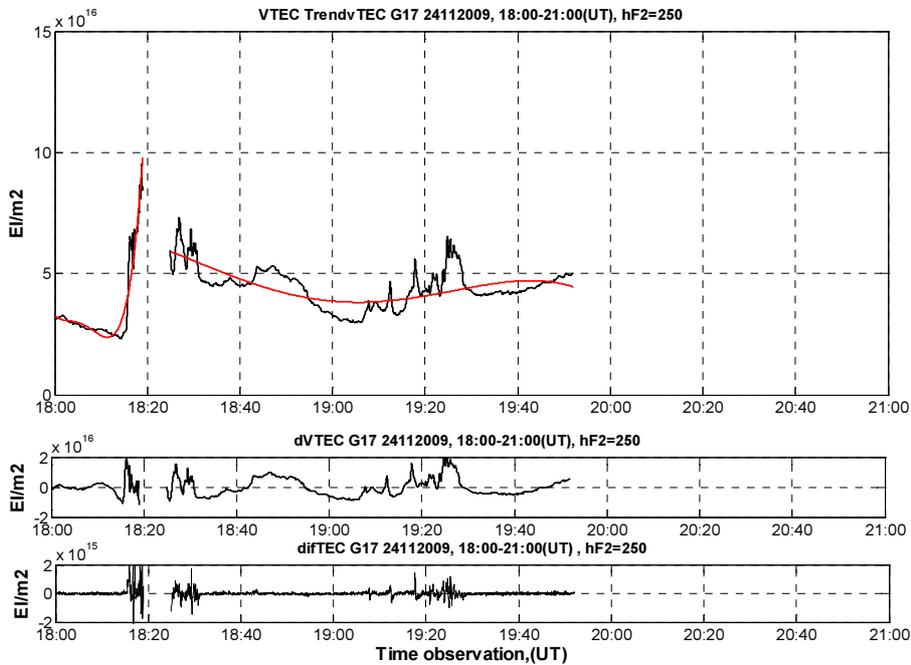


Рис. 4. Временные вариации полного электронного содержания (ПЭС) и его производных в Баренцбурге в период развития суббури в полярных сияниях
 Fig. 4. Temporal variations of the total electron content (TEC) and its derivatives in Barentsburg during development of aurora substorm

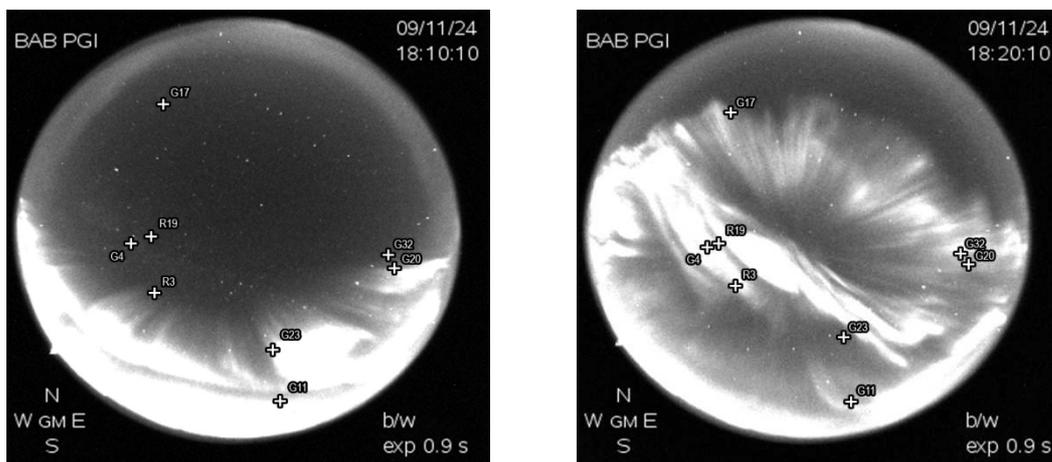


Рис. 5. Снимки полярных сияний, полученные камерой всего неба в Баренцбурге, совместно с возможностью прогноза появления полярных сияний в заданном районе земной поверхности
 Fig. 5. Pictures of auroras received by the entire sky camera in Barentsburg, together with the ability to forecast the appearance of auroras in the given area of the Earth's surface

Такой прогноз был развит авторами [9; 10] в рамках российско-норвежского проекта NORUSKA на основании карт овала, полученных в ПГИ по многолетним данным сети наблюдательных пунктов полярных сияний в Арктике. Проверка соответствия пространственно-временного распределения неоднородностей и сияний аврорального овала в планетарном масштабе проводилась для случаев с различной геомагнитной возмущенностью. Анализ одного из них приводится ниже. Как следует из рис. 6, изолированная магнитная

буря наблюдалась между 7 и 8 января 2015 г. (UT). Об этом свидетельствуют резкие изменения величины индексов геомагнитных возмущений Kp, Dst и AE. На рис. 7 в географических координатах приведены карты овала полярных сияний, построенных согласно данным нашего прогноза, и карты пространственно-временного распределения ионосферных неоднородностей.

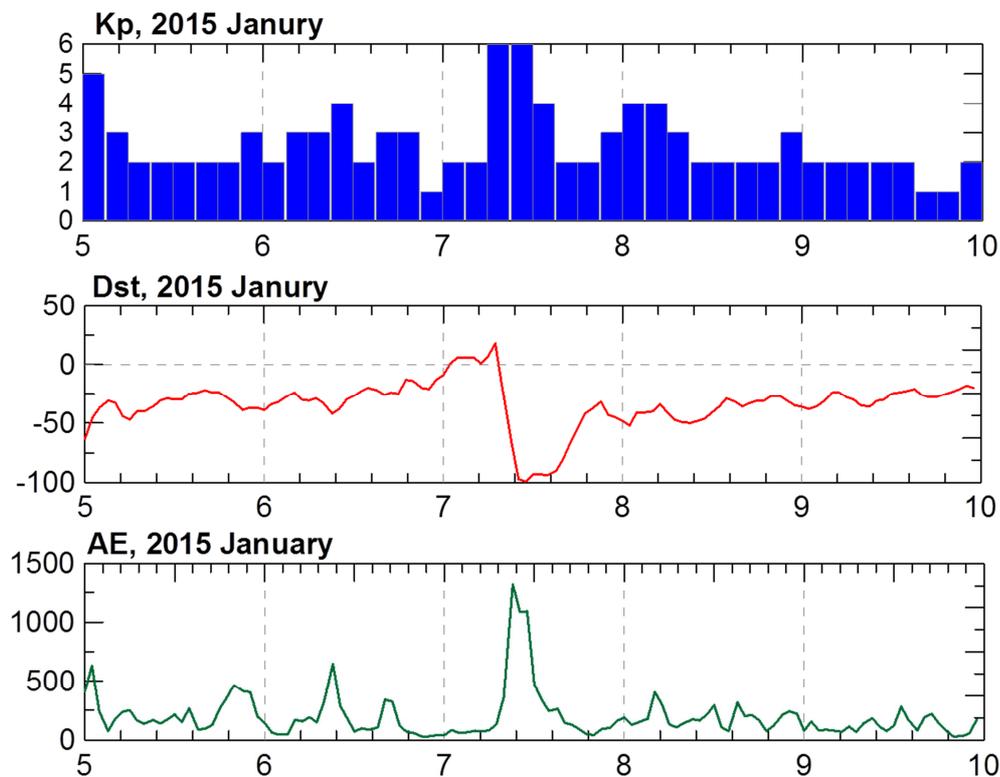


Рис. 6. Временной ход развития магнитных возмущений с 5 по 10 января 2015 года, представленный глобальными индексами Kp и Dst и полярным AE

Fig. 6. The time course of development of magnetic disturbances from 5 to 10 January 2015 submitted by the global index Kp and Dst and AE polar

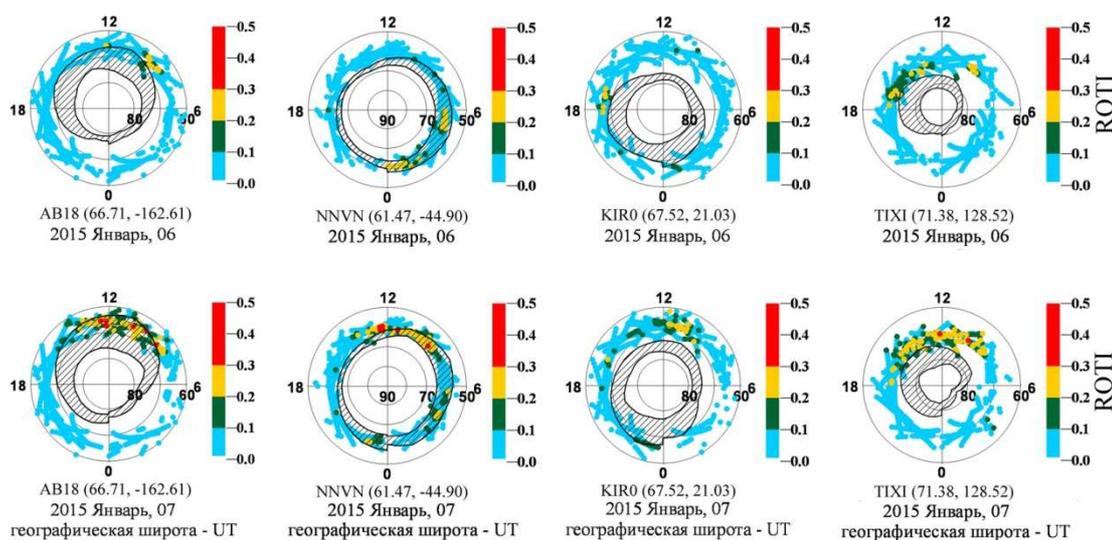


Рис. 7. Совместное расположение пространственно-временного распределения полярных сияний (аврорального овала) и пространственно-временного распределения неоднородностей ПЭС.

Овал сияний обозначен заштрихованной областью. Овал неоднородностей представлен отрезками различной амплитуды согласно шкале интенсивности

Fig. 7. Co-location of time-spatial distribution of auroras (aurora oval) and time-spatial distribution of TEC heterogeneities. The aurora oval is indicated by the shaded area. The heterogeneity oval is represented by segments of different amplitude according to the intensity scale

Очевидно, что даже при первичном рассмотрении оба распределения имеют подобную овальную структуру, а кроме того толщина аврорального овала находится в соответствии с ростом числа неоднородностей ПЭС.

Если установить достаточно обоснованное однозначное соответствие между появлением полярных сияний и неоднородностей ПЭС в ионосфере, то задача прогноза появления интервалов, в которых ожидаются нарушения в работе навигационных систем, может быть решена. Очередным шагом к решению этой задачи стал патент на метод определения местоположения объекта [11].

В настоящей работе приведены дополнительные данные в пользу правильности изложенной концепции.

Заключение

Продемонстрировано соответствие пространственно-временного распределения сияний аврорального овала и пространственно-временных изменений параметров сигнала навигационных спутников, определяемых региональными и локальными неоднородностями полного электронного содержания – ПЭС, или Total Electron Content – TEC и задержками сигнала в полярной ионосфере. Использование в качестве индикатора нарушений в системе GPS/ГЛОНАСС данных о полярных сияниях может значительно повысить точность позиционирования в Арктике с помощью спутниковых навигационных систем.

Библиографический список

1. Афраимович Э. Л., Перевалова Н. П. GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли. Иркутск : ГУ НЦ ВСНЦ СО РАМН, 2006. 480 с.
2. GPS scintillation in the high Arctic associated with an auroral arc / A. M. Smith, C. N. Mitchell, R. J. Watson, R. W. Meggs, P. M. Kintner, K. Kauristie, F. Honary // Space Weather. 2008. V. 6. P. S03D01.
3. Chernouss S. A., Kalitenkov N. V. The dependence of GPS positioning deviation on auroral activity. International Journal of Remote Sensing. 2011. V. 32, Iss. 11: Atmospheric Studies by Optical Methods. 36th Annual Meeting. P. 3005–3017.
4. Conjugate and inter-hemispheric occurrence of GPS TEC fluctuations in high latitude ionosphere / I. Shagimuratov, S. Chernouss, I. Efishov, N. Tepenitsyna, L. Koltunen // Physics of Auroral Phenomena, Proc. XXXIII Annual Seminar, Apatity, 2011. P. 151–154.
5. Исследования особенностей навигационных сигналов в период авроральных возмущений / С. А. Черноус, М. В. Швец, М. В. Филатов, И. И. Шагимурагов, Н. В. Калитенков // Химическая физика. 2015. Т. 34, № 10. С. 1–7.
6. Хорошева О. В. Пространственно-временное распределение полярных сияний. М. : Наука, 1967. 84 с.
7. Feldstein Y. I. Auroral oval. J. Geophys. Res. 1973. V. 78, N 7. P. 1210–1213.
8. GPS phase fluctuations and ultraviolet images from the polar satellite / J. Aarons, B. Lin, M. Mendillo, K. Liou, M. Codrescu // J. Geophys. Res. 2000. V. 105. P. 5201–5213.
9. Старков Г. В. Математическое описание границ аврорального свечения. Геомагнетизм и аэрномия. 1994. Т. 34, № 3. С. 80–86.
10. Two methods to forecast auroral displays / F. Sigernes, M. Dyrland, P. Brekke, S. Chernouss, D. A. Lorentzen, K. Oksavik, C. S. Deehr // Journal of Space Weather and Space Climate (SWSC). 2011. V. 1, N 1, A03, DOI:10.1051/swsc/2011003.
11. Способ определения местоположения объекта : пат. 2484494 Рос. Федерация / Калитенков Н. В., Калитенков А. Н., Милкин В. И., Терещенко Е. Д., Черноус С. А. № 2011145217/07 ; заявл. 07.11.2011 ; опубл. 10.06.2013.

References

1. Afraymovich E. L., Perevalova N. P. GPS-monitoring verhney atmosfery Zemli [GPS-monitoring of the upper atmosphere of the Earth]. Irkutsk : GU NTs VSNTs SO RAMN, 2006. 480 p.
2. GPS scintillation in the high Arctic associated with an auroral arc / A. M. Smith, C. N. Mitchell, R. J. Watson, R. W. Meggs, P. M. Kintner, K. Kauristie, F. Honary // Space Weather. 2008. V. 6. P. S03D01.
3. Chernouss S. A., Kalitenkov N. V. The dependence of GPS positioning deviation on auroral activity. International Journal of Remote Sensing. 2011. V. 32, Iss. 11: Atmospheric Studies by Optical Methods. 36th Annual Meeting. P. 3005–3017.
4. Conjugate and inter-hemispheric occurrence of GPS TEC fluctuations in high latitude ionosphere / I. Shagimuratov, S. Chernouss, I. Efishov, N. Tepenitsyna, L. Koltunen // Physics of Auroral Phenomena, Proc. XXXIII Annual Seminar, Apatity, 2011. P. 151–154.
5. Issledovaniya osobennostey navigatsionnyh signalov v period avroralnyh vozmuscheniy [Research of peculiarities of navigation signals during auroral disturbances] / S. A. Chernous, M. V. Shvets, M. V. Filatov, I. I. Shagimuratov, N. V. Kalitenkov // Himicheskaya fizika. 2015. V. 34, N 10. P. 1–7.

6. Horosheva O. V. Prostranstvenno-vremennoe raspredelenie polyarnykh siyaniy [Space-time distribution of aurora]. М. : Nauka, 1967. 84 p.
7. Feldstein Y. I. Auroral oval. J. Geophys. Res. 1973. V. 78, N 7. P. 1210–1213.
8. GPS phase fluctuations and ultraviolet images from the polar satellite / J. Aarons, B. Lin, M. Mendillo, K. Liou, M. Codrescu // J. Geophys. Res. 2000. V. 105. P. 5201–5213.
9. Starkov G. V. Matematicheskoe opisanie granits avroralnogo svecheniya [The mathematical description of the auroral emission borders]. Geomagnetizm i aeronomiya. 1994. V. 34, N 3. P. 80–86.
10. Two methods to forecast auroral displays / F. Sigernes, M. Dyrland, P. Brekke, S. Chernouss, D. A. Lorentzen, K. Oksavik, C. S. Deehr // Journal of Space Weather and Space Climate (SWSC). 2011. V. 1, N 1, A03, DOI:10.1051/swsc/2011003.
11. Sposob opredeleniya mestopolozheniya ob'ekta [A method for determining the location of the object] : pat. 2484494 Ros. Federatsiya / Kalitenkov N. V., Kalitenkov A. N., Milkin V. I., Tereschenko E. D., Chernous S. A. N 2011145217/07 ; zayavl. 07.11.2011 ; opubl. 10.06.3013.

Сведения об авторах

Черноус Сергей Александрович – ул. Халтурина, 15, г. Мурманск, Россия, 183010; Полярный геофизический институт, канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; e-mail: chernouss@pgia.ru

Chernouss S. A. – 15, Halturina Str., Murmansk, Russia, 183010; Polar Geophysical Institute, Cand. of Phys.-Math. Sci., Senior Researcher; e-mail: chernouss@pgia.ru

Шагимуратов Ирк Ибрагимович – пр. Победы, 41, г. Калининград, Россия, 236017; Западный филиал Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн РАН, канд. физ.-мат. наук, директор; e-mail: shagimuratov@mail.ru

Shagimuratov I. I. – 41, Pobedy Avenue, Kaliningrad, Russia, 236017; West Branch of the Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation RAS, Cand. of Phys.-Math. Sci., Director; e-mail: shagimuratov@mail.ru

Вульфович Борис Аркадьевич – ул. Спортивная, 13, г. Мурманск, Россия, 183010; Мурманский государственный технический университет, Морской институт, кафедра судовождения, д-р техн. наук, профессор; e-mail: vulfovichb@yahoo.com

Vulfovich B. A. – 13, Sportivnaya Str., Murmansk, Russia, 183010; Murmansk State Technical University, Marine Institute, Navigation Department, Dr of Tech. Sci., Professor; e-mail: vulfovichb@yahoo.com

Калитёнков Николай Васильевич – ул. Спортивная, 13, г. Мурманск, Россия, 183010; Мурманский государственный технический университет, Морской институт, кафедра радиотехники и радиотелекоммуникационных систем, канд. техн. наук, доцент, зав. кафедрой; e-mail: KalitenkovNV@mstu.edu.ru

Kalitenkov N. V. – 13, Sportivnaya Str., Murmansk, Russia, 183010; Murmansk State Technical University, Marine Institute, Radio Engineering and Telecommunications Systems Department, Cand. of Tech. Sci., Associate Professor, Head of Department; e-mail: KalitenkovNV@mstu.edu.ru

S. A. Chernouss, I. I. Shagimuratov, B. A. Vulfovich, N. V. Kalitenkov

Navigation GPS/GLONASS in the Arctic and aurora

The correspondence of the time-spatial distribution of the radiances of the aurora oval and time-spatial changes in the parameters of the navigation satellites' signal has been shown. For this aim the experimental data on the regional and local heterogeneities of the Total Electron Content (or TEC) and the data on the signal delays in the polar ionosphere have been analyzed. Using the data concerning aurora as the indicator of disturbances in the work of the GPS/GLONASS systems can give the opportunity to increase considerably the accuracy of positioning in the Arctic with the help of satellite navigation systems (SNS).

Key words: polar ionosphere, aurora oval, dynamics of oval, signal of navigation satellites, heterogeneity of electronic content, satellite navigation systems, accuracy of positioning.