

С. А. Черноус, В. В. Алпатов, П. А. Будников, М. В. Филатов

**СОПОСТАВЛЕНИЕ ПОЛОЖЕНИЯ АВРОРАЛЬНОГО ОВАЛА И
ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ИНДЕКСА
ФЛУКТУАЦИЙ ПЭС ПО ДАННЫМ СЕТИ СТАНЦИЙ РАДИОТОМОГРАФИИ
ИОНОСФЕРЫ**

Аннотация

В работе проводится сопоставление положения аврорального овала на основе модели, базирующейся на отечественных данных, с положением пространственно-временного распределения флуктуаций полного электронного содержания (ПЭС) по данным сети станций радиотомографии Госкомгидромета в период магнитной бури 25-26 августа 2018. Установлено, что в период этой бури наблюдается тенденция соответствия обоих распределений.

Ключевые слова:

вариации ПЭС, полярные сияния, авроральные возмущения.

S. A. Chernouss, V. V. Alpatov, P. A. Budnikov, M. V. Filatov

**COMPARISON OF THE POSITION OF THE AURORAL OVAL AND THE SPACE-
TIME DISTRIBUTION OF THE TEC FLUCTUATION INDEX ACCORDING TO DATA
OF THE IONOSPHERE RADIO TOMOGRAPHY STATIONS NETWORK**

Abstract

This paper compares the position of the auroral oval based on its model with the position of the space-time distribution of total electron content (TEC) fluctuations according to the radio tomography network of the State Hydrometeorological Committee during the magnetic storm August 25-26, 2018. It was established that both distributions have a tendency to coincide during this storm.

Keywords:

TEC variations, aurora, auroral disturbances

Введение

В настоящее время хорошо известна тесная связь между полярными сияниями и флуктуациями полного электронного содержания в полярной ионосфере, определяющего прохождение трансionoсферных сигналов и точность позиционирования [1-4]. Особенность полярной ионосферы заключается в ее структуре и изменчивости, вызванных вторжением заряженных частиц, что отражается на распространении сигналов навигационных спутников. Авторы 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. Само увеличение структуризации ионосферы – это увеличение как количества, так и интенсивности ионосферных неоднородностей во время полярных сияний, что может привести к ухудшению качества приёма GPS/ГЛОНАСС сигналов в высоких широтах. Это позволяет использовать сияния в качестве диагностического инструмента для

оценки вариаций полного электронного содержания и электронной концентрации на различных высотах. Существование в высокоширотной ионосфере различного масштаба неоднородностей обуславливает флуктуации (сцинтилляции) амплитуды и фазы трансionoсферных ГЛОНАСС/GPS сигналов. Эти флуктуации являются основным источником ошибок при позиционировании и местоопределении в арктическом регионе, что в итоге приведет к ухудшению качества позиционирования, а во время интенсивных магнитосферных возмущений даже к невозможности определения местоположения в целом.

В настоящее время исследования по рассматриваемому направлению носят разрозненный характер или касаются анализа отдельных геофизических событий на основе данных международной сети IGS [5]. В настоящей работе впервые проводится сопоставление положения аврорального овала на основе модели, базирующейся на отечественных исследованиях с положением пространственно-временного распределения флуктуаций полного электронного содержания (ПЭС) по данным также отечественных измерений на сети станций радиотомографии ионосферы Госкомгидромета.

Материалы и методы

Модель прогноза овала полярных сияний

Овал полярных сияний, открытый советскими учеными [6-8], представляет собой фактически естественную систему координат, относительно которой рассматривается развитие плазменных явлений в околоземном космическом пространстве. В этой работе используется модель прогноза Svaltrack II [9, 10], расположенная на сайте www.kho.unis.no и созданная на базе работ [6-8]. На сайте приведены изображения полярных сияний, которые генерируются программой Aurora Forecast 3D-Skyview. Они обновляются каждые 15 минут (Рис. 1). Изображение в виде зеленого овального пояса показывает размер и местоположение зоны полярных сияний. В эту анимацию включены 5 авроральных станций, включая Апатиты.

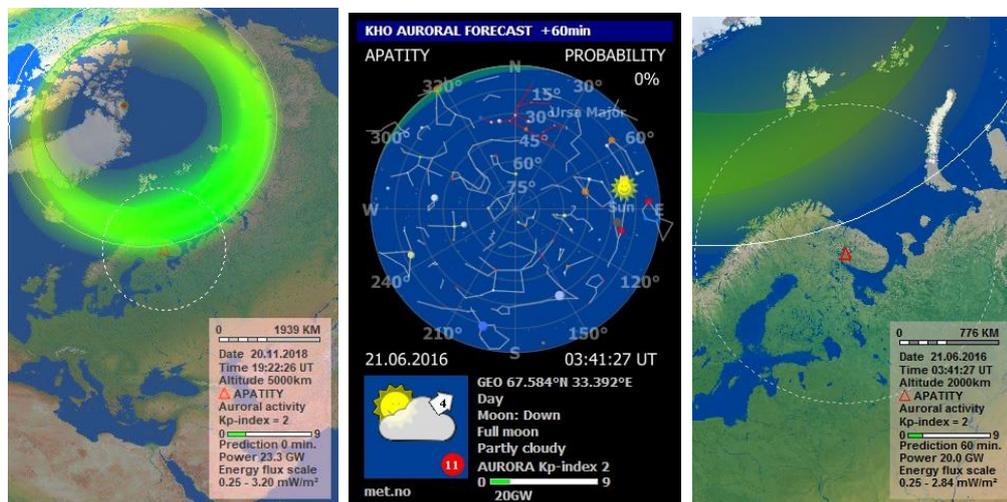


Рис. 1. Aurora Forecast 3D - Skyview.

Ключевым аспектом построения модели является связь между морфологией аврорального овала и уровнем геомагнитной активности [8-10], что позволяет нам разрабатывать модели идентификации расположения полярных сияний независимо от “капризов” текущих авроральных наблюдений. Для математического расчета размера и местоположения аврорального овала используется развитый в ПГИ метод Старкова [10]. Модель использует планетарный индекс Кр и время в качестве входных данных, что делает ее идеальным кандидатом для диагностики полярных сияний. Зависимость местоположения аврорального овала для различных геофизических ситуаций. Однако в этих разработках речь идет только о диагностике (действительно, Кр-индекс, получаемый по данным сети магнитометров, может быть определен лишь во время или после событий). Оказалось однако, что индекс Кр можно прогнозировать по измерениям параметров солнечного ветра на спутнике ACE в точке Лагранжа на расстоянии порядка 1 миллиона километров от Земли, когда поток заряженных частиц еще не дошел до Земли. Такой виртуальный 15-минутный Кр-индекс WING был разработан и представлен в Интернете Центром прогнозирования космической погоды США (NOAA-SWPC). Таким образом, важные для прогноза данные, зависимость положения аврорального овала от Кр индекса и краткосрочный прогноз самого Кр-индекса, дают возможность прогнозирования положения аврорального овала.

Сеть радиотомографии Госкомгидромета

До недавнего времени в Российской Федерации системы мониторинга ионосферы в реальном времени отсутствовали. Их создание стало возможным после разработки МГУ, ПГИ [12] и развертывания Институтом прикладной геофизики (ИПГ) Росгидромета на территории России сети наземных ГНСС-станций и создания сети радиотомографии ионосферы в период 2011-2015 г.г. [13, 14]. Мониторинг ионосферы важен не только для исследований ионосферы, но и для навигационных и коммуникационных приложений. Приемники GNSS могут обеспечивать ионосферные измерения общего содержания электронов и уровня сцинтилляции. Российская сеть мониторинга ионосферы имеет более 130 действующих станций GNSS, распределенных по стране. Значительная часть сети размещена в полярном и субполярном регионе, в том числе 6 станций на Кольском полуострове. Эта сеть предоставляет данные для системы мониторинга в реальном времени и трехмерной ионосферной томографии. Система мониторинга ионосферы в реальном времени дает карты ПЭС, амплитудные сцинтилляционные индексы, фазовые сцинтилляционные индексы, скорость изменения интенсивности ПЭС.

Результаты и обсуждение

В работе представлен первый опыт сопоставления пространственно-временного развития аврорального овала и пространственно-временного развития картины неоднородностей ПЭС RoTI. RoTI (Rate of TEC Index) рассчитывался по формуле $RoTI = \sqrt{\langle ROT^2 \rangle} - \langle ROT \rangle^2$ с использованием данных сети ионосферной радиотомографии на основе материалов, полученных в период развития магнитной бури 25-26 августа 2018 г. [15].

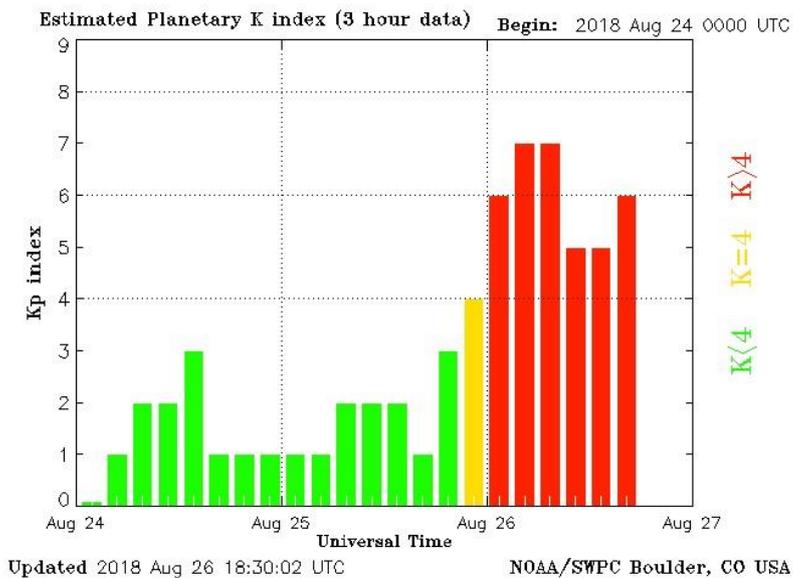


Рис. 2. Планетарные Kp индексы 24-27 Августа 2018 г.

На рис. 2 приводится временной ряд Kp индексов, характеризующих планетарную геомагнитную активность. Из рис. 2 следует, что наибольшие Kp индексы 4-7 имели место в период 25-26 августа, что должно выражать общее возмущенное состояние космической погоды и, в частности, смещение овала полярных сияний к экватору.

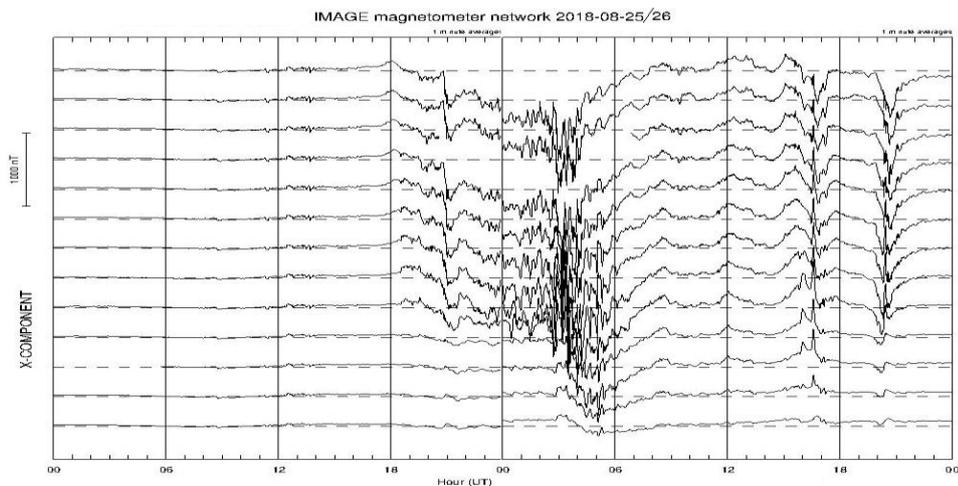


Рис. 3. Измерения X компоненты на сети магнитометров IMAGE.

Региональная геомагнитная активность на меридиане Баренц-региона отображена на рис. 3, где представлено временное развитие магнитной бури 25-26 августа 2018 года на сети станций Финского метеорологического института IMAGE <http://fmi.fi>, пункты наблюдений которой расположены от юга Финляндии до архипелага Шпицберген. Очевидно, что максимум возмущений в

X-компоненте магнитного поля Земли имеет место южнее обсерватории Соданкюла, что соответствует экваториальному сдвигу овала полярных сияний и достигает величины более 1000 нТ в ночные часы 26 августа.

На рис. 4 и 5 изображены карты с положением аврального овала при данной геомагнитной активности (левая часть рисунков) и карты распределения интенсивности RoTI по данным сети радиотомографии Роскомгидромета. Сопоставление этих карт (картин) указывает на следующие закономерности.

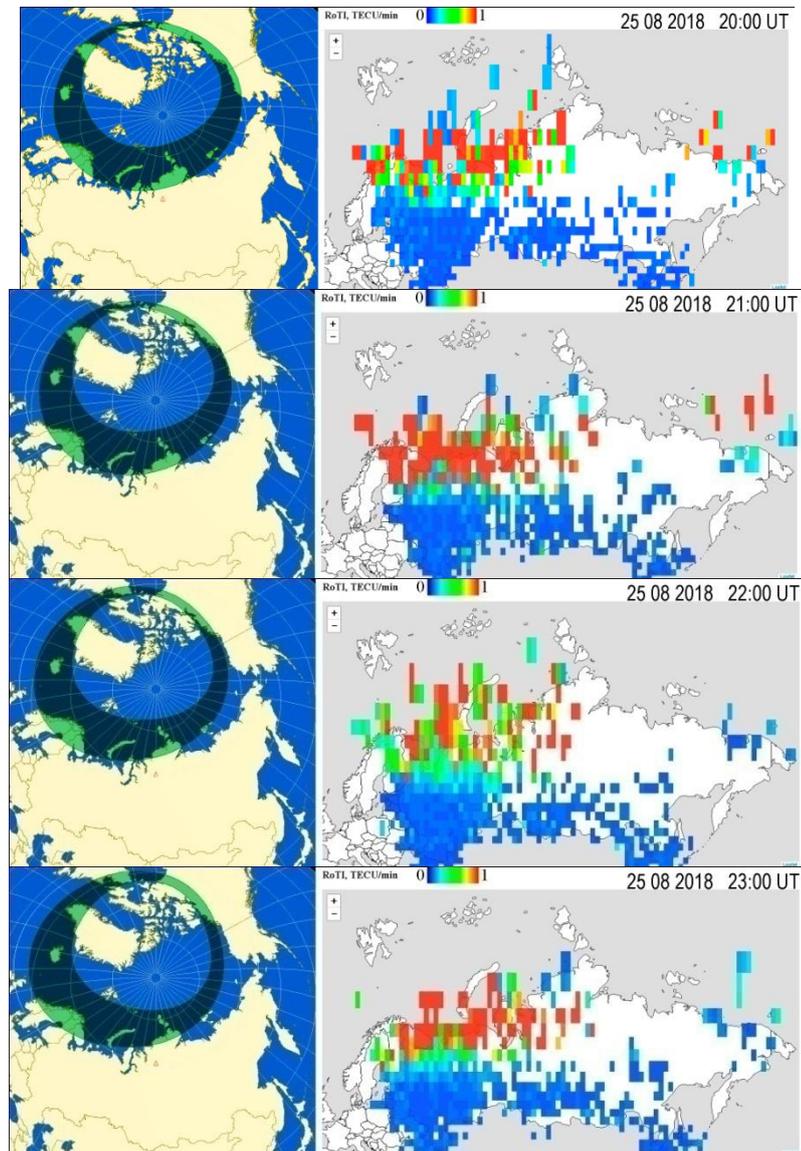


Рис. 4. Развитие местоположения аврального овала и пространственно-временного распределения неоднородностей ПЭС (RoTI) 25 Августа 2018.

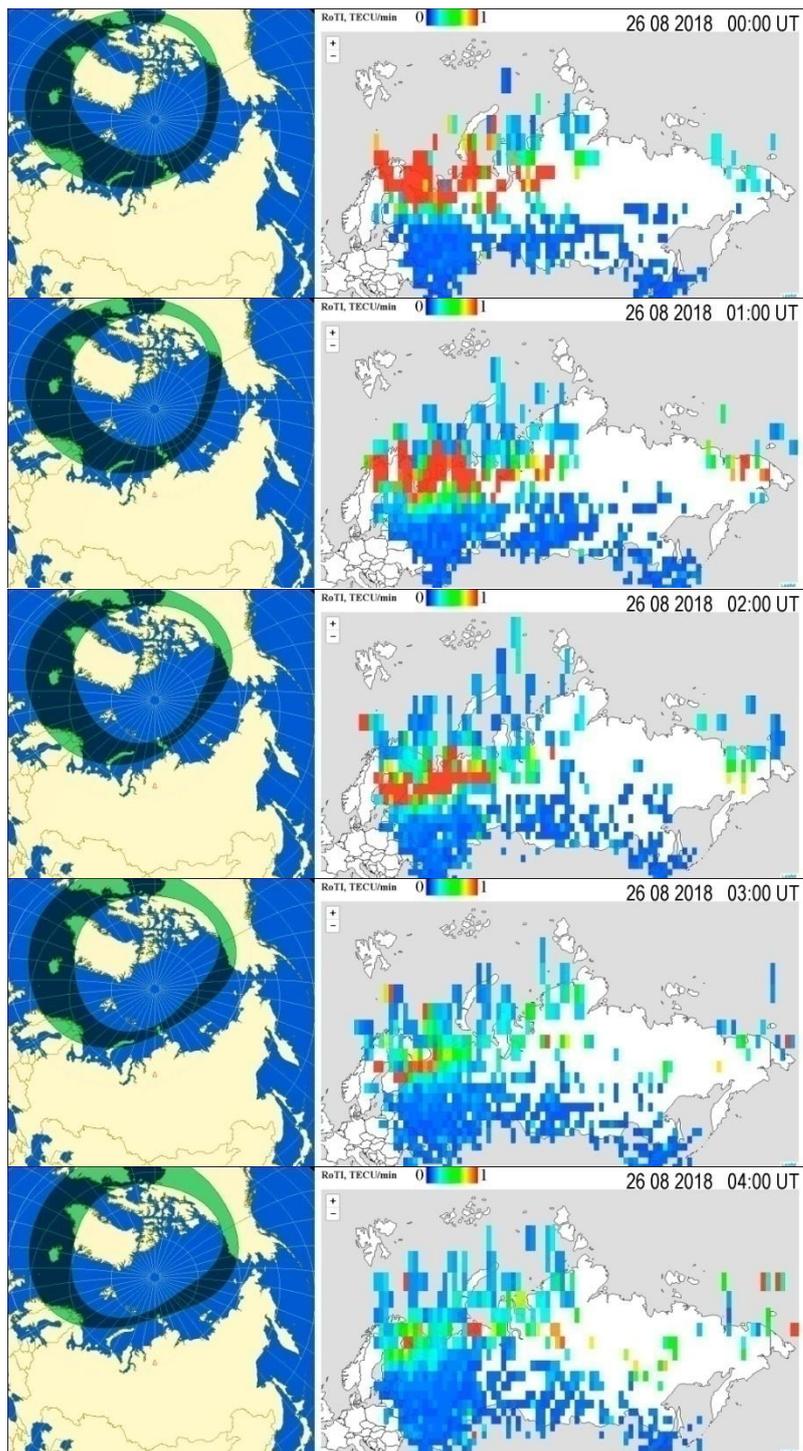


Рис. 5. Развитие местоположения аврального овала и пространственно-временного распределения неоднородностей ПЭС (RoTI) 26 Августа 2018 г.

Очевидно, что общим для всех карт рис. 4 является расположение максимумов RoTI в ночное время в предполуночные часы, что грубо совпадает с положением ночной интенсивной части овала сияний. С другой стороны, данные рис. 5 демонстрируют, что именно положение более тонкой части овала контролирует появление неоднородностей ПЭС. Это хорошо заметно по данным над Кольским полуостровом. И в том, и в другом случае он покрыт полярными сияниями приблизительно одинаково.

Однако это нельзя рассматривать, как противоречие. Дело в том, что положение овала связано как с пространственными, так и с временными вариациями. Действительно, за счет поворота овал сияний «наехал» на Мурманск (рис. 4) своей тонкой частью, и, казалось бы, что интервал наблюдений RoTI должен тоже сузиться. Но этого не произошло, так как именно в ранние послеполуночные часы 26 августа имело место максимальное возмущение типа бухты в X-компоненте магнитного поля Земли (рис. 2-3). Так как мы не используем в этой работе данные европейских станций, то можем только предполагать, что пространственно-временная структура RoTI западнее Кольского полуострова также имеет сходство с авроральным овалом. Косвенно об этом свидетельствует наблюдаемое на рис. 5 смещение структур RoTI с восточных станций вместе с перемещением (поворотом) сияний с востока на запад.

Таким образом, данные отечественных измерений демонстрируют тенденцию к сходству пространственно-временных вариаций и динамики структур оптических полярных сияний и RoTI. Отметим, что точного визуального совпадения этих явлений быть и не должно. Действительно, авроральный овал был построен по измерениям высоты дискретных форм сияний в E-слое ионосферы, в то время как верхние концы лучистых форм могут достигать слоя F2, где и происходит взаимодействие трансионосферных сигналов от высокоорбитальных спутников с ионосферой. Для нахождения точного соотношения между параметрами обеих структур необходимо провести статистические исследования экспериментальных оптических и радиофизических данных и представить численные расчеты по их связи. При наличии подобной модели открывается возможность прогнозирования появления неоднородностей и флуктуаций ПЭС, так как прогноз овала полярных сияний уже осуществлен и может быть использован для прогноза сопутствующих явлений.

Литература

1. Aarons J. Global positioning system phase fluctuations at auroral latitudes // *Journal of Geophysical Research*. 1997. 102(A8). p. 17219-17231.
2. Калитенков Н.В., Калитенков А. Н., Милкин В. И., Терещенко Е. Д., Черноус С. А. Патент № 2484494 «Способ определения местоположения объекта» от 10.06.2013 г. Электронный бюллетень «Изобретения и полезные модели» 2013 г. №16.
3. Chernouss S.A., Kalitenkov N.V. The dependence of GPS positioning deviation on auroral activity // *International Journal of Remote Sensing*. 2011. 32(1). p. 3005-3017.
4. Chernous S.A., Shvets M.V., Filatov M.V., Shagimuratov I.I., Kalitenkov N.V. Studying navigation signal singularities during auroral disturbances // *Russian Journal of Physical Chemistry B*. 2015. Т. 9. № 5. p. 778-784.

5. Chernouss S.A., Shagimuratov I.I., Ievenko I.B., Filatov M.V., Efishov I.I., Shvets M.V., Kalitenkov N.V. Aurora as Indicator of the Ionospheric Impact on TransIonospheric Navigation Signals // Proceedings of V Intern. Conf. "Atmosphere, Ionosphere, Safety" (AIS-2016), Kaliningrad, Russia. 2016. p. 185—191.
6. Feldstein Ya.I., Starkov G.V. Dynamics of auroral belt and polar geomagnetic disturbances // Planet. Space Sci. 1967. vol. 15, no. 2, pp. 209–230.
7. Хорошева О.В. Пространственно-временное распределение полярных сияний // М.: Наука, 1967. 82 с.
8. Starkov, G. V., Mathematical model of the auroral boundaries // Geomagnetism and Aeronomy. 1994. 34. 3. 331–336.
9. Sigernes F., M. Dyrland, P. Brekke, E. K. Gjengedal, S. Chernouss, D. A. Lorentzen, K. Oksavik and C. S. Deehr, Real time aurora oval forecasting – SvalTrackII // Optica Pura y Aplicada (OPA). 2011. 44. 599-603.
10. Sigernes F., M. Dyrland, P. Brekke, S. Chernouss, D.A. Lorentzen, K. Oksavik, and C.S. Deehr, Two methods to forecast auroral displays // Journal of Space Weather and Space Climate (SWSC). 2011. Vol. 1. No. 1, A03.
11. Costello K. A. Moving the Rice MSFM into a Real-Time Forecast Mode Using Solar Wind Driven Forecast Models, Ph.D. dissertation, Rice University, Houston, TX, June 1997.
12. Куницын В.Е., Терещенко Е.Д., Андреева Е.С. Спутниковое радиозондирование и радиотомография ионосферы // Успехи физических наук. 2010. Т. 180. № 5. С. 548-553.
13. Алпатов В.В., А.Е. Васильев, П.А. Будников, Д.А. Молодцов, А.Ю. Репин Новый инструмент мониторинга ионосферы – сеть радиотомографии. // практические аспекты гелиогеофизики. материалы специальной секции «Практические аспекты науки космической погоды» // «Физика плазмы в солнечной системе», Институт космических исследований. 2016. С. 56 - 63.
14. Алешин И.М., В.В. Алпатов, А.Е. Васильев, С.С. Бургучев, К.И. Холодков, Ф.В. Передерин Опыт создания оперативной службы сбора данных сети наземных станций глобальных навигационных спутниковых систем // Вестник краунц. науки о Земле. 2015. № 1. выпуск № 25. С.1-4.
15. Chernous S., P. Budnikov, I. Shagimuratov, V. Alpatov, M. Filatov, I. Efishov and N.Tepenitsina, Variations of GNSS signals in Euro-Arctic region during auroral Activity, 45th Annual European Meeting on Atmospheric Studies by Optical Methods, 27-31 August 2018, Kiruna, Sweden, p.10.

Сведения об авторах

Черноус Сергей Александрович

с. н. с. Полярный геофизический институт, к.ф-м.н.
 Россия, 184209, Мурманская область, г. Апатиты, мкр. Академгородок, д. 26а.
 E-mail: chernouss@pgia.ru

Алпатов Виктор Владимирович

зав. отделом ФГБУ, к.ф-м.н. "Институт прикладной геофизики имени академика Е.К.Федорова", Россия, 129128, г. Москва, ул. Ростокинская, д. 9.
 E-mail: v_alpatov@mail.ru

Будников Павел Алексеевич

н. с., ФГБУ "Институт прикладной геофизики имени академика Е.К.Федорова".
Россия, 129128, г. Москва, ул. Ростокинская, д. 9.
E-mail: pavel9860@gmail.com

Филатов Михаил Валерьевич

м. н. с., Полярный геофизический институт,
Россия, 184209, Мурманская область, г. Апатиты, мкр. Академгородок, д. 26а.
E-mail: mijgun@yandex.ru