

## **“ПОЛЯРНЫЕ” И “ВЫСОКОШИРОТНЫЕ” СУББУРИ И УСЛОВИЯ В СОЛНЕЧНОМ ВЕТРЕ**

**Ирина Дэспирак<sup>1</sup>, Андрис Любчич<sup>1</sup>, Н. Клейменова<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Полярный геофизический институт, РАН, Апатиты, Мурманская область, Россия

<sup>2</sup>Институт Физики Земли, РАН, Москва, Россия

e-mail: despirak@gmail.com

**Ключевые слова:** солнечный ветер, суббури, западный электроджет

**Аннотация:** Все наблюдающиеся на высоких широтах суббуревые возмущения можно разделить на 2 типа – «полярные» (наблюдаются только на  $>70^\circ$  при отсутствии в этот день суббурь на  $<70^\circ$ ) и «высокоширотные» суббури (перемещаются из авроральных ( $<70^\circ$ ) в полярные ( $>70^\circ$ ) геомагнитные широты). Целью исследования было сравнить условия в солнечном ветре, при которых наблюдаются эти 2 типа суббурь. Для этой цели были использованы данные цепочки магнитометров IMAGE и данные базы OMNI за 1995, 2000, 2006-2011 годы. Всего было отобрано 105 «полярных» и 55 «высокоширотных» суббурь. Показано, что «полярные» суббури, наблюдаются при низкой скорости солнечного ветра, после прохождения высокоскоростного рекуррентного потока, на поздней восстановительной фазе геомагнитной бури. «Высокоширотные» суббури, наоборот, наблюдаются при высокой скорости солнечного ветра, повышенных значениях  $B_z$  компоненты ММП,  $E_y$  компоненты электрического поля, температуры и давления солнечного ветра, во время прохождения мимо Земли высокоскоростного рекуррентного потока.

## **“POLAR” AND “HIGH LATITUDE” SUBSTORMS AND SOLAR WIND CONDITIONS**

**Irina Despirak<sup>1</sup>, Andris Liubchich<sup>1</sup>, N. Kleimenova<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Polar Geophysical Institute, RAS, Apatity, Murmansk region, Russia

<sup>2</sup>Institute of Physics of the Earth, RAS, Moscow, Russia

e-mail: despirak@gmail.com

**Keywords:** solar wind, substorms, westward electrojet

**Abstract:** All substorms observed at high latitudes can be divided into 2 types - "polar" (observed only at  $> 70^\circ$  latitudes in the absence of that day substorms at  $<70^\circ$  latitudes) and "high latitude" substorms (propagating from auroral ( $<70^\circ$ ) to polar ( $> 70^\circ$ ) geomagnetic latitudes). The aim of this study was to compare solar wind conditions during these two types of substorms. For this purpose, we used the data of IMAGE magnetometers and solar wind data base (OMNI) for 1995, 2000, 2006-2011 periods. There were selected 105 "polar" and 55 "high latitude" substorms. It is shown that "polar" substorms observed at low solar wind velocity, after passing high speed stream, during late recovery phase of a geomagnetic storm. "High latitude" substorms, on the contrary, are observed at a high values of solar wind velocity, increased values of the southward  $B_z$  component of the IMF and  $E_y$  component of the electric field, increased temperature and pressure of the solar wind, while passing by the Earth recurrent high speed stream.

### **Введение**

Известно, что во время взрывной фазы суббури сияния и западный электроджет движутся к полюсу ([1],[2],[3]). При этом распространение к полюсу полярной границы сияний происходит через серию микросуббурь и интенсификаций, так же как и смещение полярной границы электроджета к полюсу происходит как серия дискретных скачков [4],[5]. Иногда происходит распространение суббуревых возмущений до аномально высоких геомагнитных широт. При этом надо отметить, что среди суббурь, наблюдающихся на высоких геомагнитных широтах, можно выделить два разных типа - «полярные» и «высокоширотные» суббури. Первый

тип суббурь - возмущение начинается выше  $>71^\circ$  и далее наблюдается распространение возмущения к полюсу, причем на широтах  $<70^\circ$  возмущения отсутствуют. Такие суббуревые возмущения были названы «полярными» суббурами [6]. Второй тип суббурь – возмущение начинается на широтах авроральной зоны, далее происходит распространение возмущений к полюсу и в максимуме развития суббури западный электроджет (или «центр» западного электроджета) наблюдается на очень высоких геомагнитных широтах (CGLat  $>75^\circ$ ). Такие суббуревые возмущения были названы «высокоширотными» суббурами. [7], [8], [9].

Первый тип суббурь, полярные суббури, когда все возмущения сосредоточены в узкой широтной области, на широтах полярной шапки, можно отнести к возмущениям, которые происходят при низкой геомагнитной активности, когда овал полярных сияний «сжат» и сдвинут в высокие широты ([10]). Такие суббуревые возмущения были названы «суббури на сжатом овале». Исследования показали, что суббури на сжатом овале не отличаются от обычных суббурь по своим характеристикам как в ионосфере, так и в магнитосферном хвосте и обычно происходят при южном направлении Vz компоненты ММП ( $B_z > 0$ ) [11],[12],[13],[14].

Второй тип суббурь, высокоширотные суббури, когда возмущение начинается в авроральной зоне и потом распространяется до высоких широт, тоже интенсивно исследовался [15], [16], [17], [18], [19], [20], [21], [22]. Не было найдено различий в характеристиках между высокоширотными и обычными суббурами. Однако было показано, что определяющим фактором для появления высокоширотных суббурь является скорость солнечного ветра. Чем выше скорость, тем больше широта, до которой распространяется суббуря [23]. Высокоширотные суббури наблюдаются, в основном, в период минимума солнечной активности, когда преобладают высокоскоростные рекуррентные потоки из корональных дыр [7], [23]. Тогда как во время максимума солнечной активности, когда преобладают потоки, связанные с корональными выбросами массы (СМЕ), высокоширотные суббури наблюдаются редко [9], [24]. Высокоширотные суббури наблюдаются также во время прохождения областей сжатой плазмы на фронтах потоков солнечного ветра, так называемых Sheath и CIR областей [25], однако эти суббури дают небольшой вклад в статистику, так как длительность Sheath и CIR областей мала, по сравнению с длительностью высокоскоростных рекуррентных потоков солнечного ветра.

Целью нашей работы является провести сравнение межпланетных условий, при которых наблюдаются «полярные» и «высокоширотные» суббури.

## Данные

Использовались данные цепочки магнитных станций IMAGE и спутника WIND для периодов 1995, 2006-2011 годов, близких к минимуму солнечной активности и для периода максимума солнечной активности 2000 год. Характеристики солнечного ветра и межпланетного магнитного поля определялись по данным базы OMNI. За периоды 1995, 2000, 2006-2011 годы было проанализировано 160 случаев наблюдения суббурь на высоких геомагнитных широтах, из них 105 случаев «полярных» суббурь и 55 случаев «высокоширотных» суббурь. Для изучения перемещения по широте суббуревое западного электроджета использовались данные наземных магнитометров цепочки станций IMAGE, а именно, меридиональной цепочки NUR – NAL (Nurnijarvi – Ny Alesund) от  $56.89^\circ$  до  $75.25^\circ$  геомагнитной широты.

Пример наблюдения «полярных» и «высокоширотных» суббурь на цепочке станций NUR - NAL представлен на рисунке 1. Слева, на рисунке 1а представлены вариации в X-компоненте магнитного поля 6 января 2007 года, когда было 3 «полярных» суббури - в 17.15, 20.00 и 22.50. Видно, что во всех 3 случаях возмущения начались на станции BJN и далее распространялись к полюсу – до станции NAL, при этом на более низких широтах возмущения отсутствовали. Справа, на рисунке 1б, представлены вариации в X – компоненте магнитного поля 2 января 1995 года, в 21.20 наблюдалась «высокоширотная» суббуря. Суббуревые возмущения отмечены на рисунке синими овалами. Надо отметить, что 02 января 1995 наблюдалось распространение до станции NAL «центра» западного электроджета (Z-компонента магнитного поля не представлена здесь). «Центр» западного электроджета часто используется для определения широтного положения западного электроджета, так как во время взрывной фазы суббури западный электроджет занимает большую область в пространстве и бывает неоднороден [26]. Подробно метод определения положения «центра» электроджета описан в работе [9]. Надо отметить, что в нашей работе «высокоширотными» считаются суббури, у которых начало возмущения в авроральной зоне, а во время максимальной фазы «центр» западного электроджета наблюдался на станциях LYR или NAL ( $75.12^\circ$  или  $75.25^\circ$  геомагнитной широты).

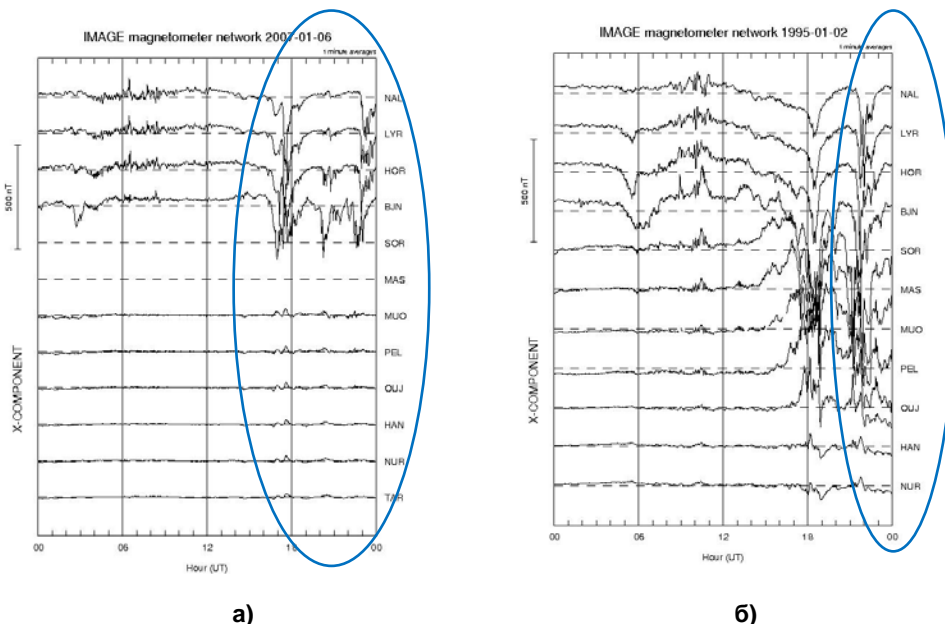


Рисунок 1. Примеры наблюдения «полярных» (1а) и «высокоширотной» (1б) суббурь. Показаны вариации X-компоненты магнитного поля на меридиональной цепочке станций NUR-NAL за 06 января 2007 (1а) и 02 января 1995 года (1б), рассматриваемые суббуревые возмущения отмечены овалами.

### Результаты

Оба типа суббурь - «полярные» и «высокоширотные» с помощью базы данных OMNI были сопоставлены с межпланетными условиями : наличие или отсутствие каких-либо потоков солнечного ветра, наличие геомагнитной бури и т.д. Результат представлен на рисунке 2.

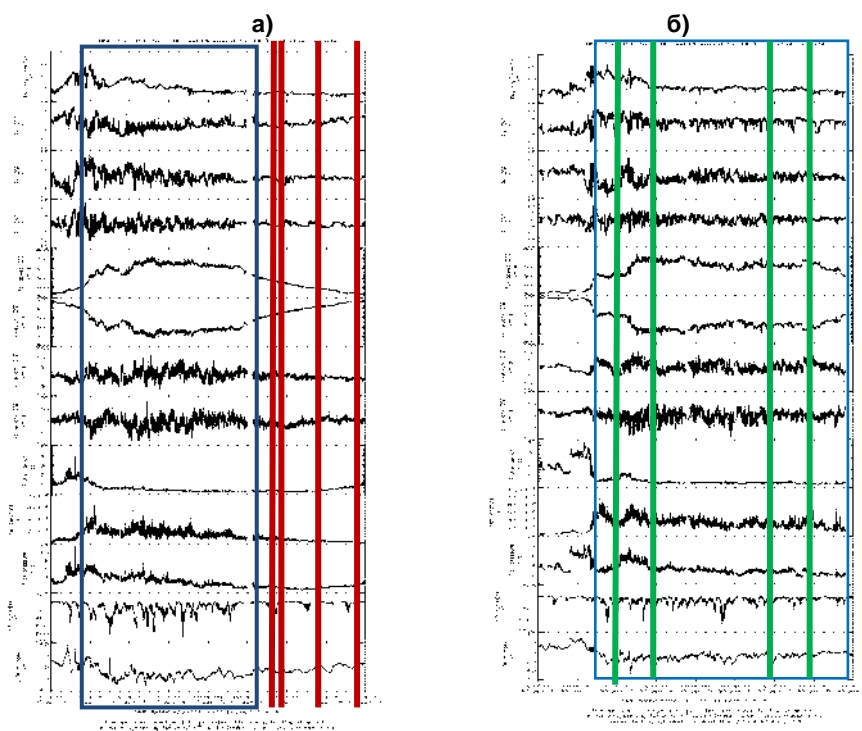


Рисунок 2. Параметры солнечного ветра и ММП ( $B_T$ ,  $B_X$ ,  $B_Y$ ,  $B_Z$ ,  $V$ ,  $V_X$ ,  $N$ ,  $T$ ,  $P$ ) и индексы AL и SYMNH для двух высокоскоростных потоков: 2-8 января 2007 года и 2-8 января 1995 года. Границы высокоскоростного потока показаны синими прямоугольниками, время начала «полярных» и «высокоширотных» суббурь по данным IMAGE отмечено вертикальными красными и зелеными линиями, соответственно.

На рисунке 2 показаны данные по солнечному ветру и межпланетному магнитному полю для 2-х высокоскоростных потоков, 2-8 января 2007 года и 2-8 января 1995 года. Сверху вниз: магнитуда магнитного поля и  $B_X$ ,  $B_Y$ ,  $B_Z$  компоненты магнитного поля, потоковая скорость  $V$ ,  $X$ -

компонента скорости солнечного ветра, плотность  $N$ , температура  $T$  и давление  $P$  солнечного ветра, и геомагнитные индексы  $AL$  и  $SYMNH$ . На эти данные наложены моменты начала «полярных» и «высокоширотных» суббурь по данным цепочки магнитных станций IMAGE. На рисунке 2а представлен пример условий в солнечном ветре, когда наблюдаются «полярные» суббури, на рисунке 2б – когда наблюдаются «высокоширотные» суббури (моменты начала суббурь отмечены красными и зелеными вертикальными линиями). Видно, что «полярные» суббури наблюдаются на фазе спада скорости солнечного ветра, в конце высокоскоростного потока или после его прохождения, во время восстановительной фазы геомагнитной бури. Высокоширотные суббури, наоборот, наблюдаются при высокой скорости солнечного ветра, во время прохождения высокоскоростного потока.

На рисунке 3 представлены значения параметров солнечного ветра за полутора часовой интервал, предшествующий моменту максимального развития суббури. Полуторачасовой интервал усреднения был выбран, чтобы учесть тот факт, что процесс поступления энергии может происходить не только во время предварительной фазы суббури (~1 ч), но и во время взрывной фазы (при  $B_z < 0$ ). Показаны усредненная  $V_x$  скорость солнечного ветра,  $B_z$  компонента ММП,  $E_y$  компонента электрического поля, температура и давление солнечного ветра, наблюдавшиеся перед началом «полярных» и «высокоширотных» суббурь. Видно, что основным фактором, по которому различаются эти 2 типа суббурь, является скорость солнечного ветра. «Полярные» суббури наблюдаются при низких скоростях (в основном, ~300-400 км/сек), а высокоширотные – при высокой скорости (>500 км/сек). Кроме того высокоширотные суббури наблюдаются при более высоких значениях южной компоненты ММП,  $E_y$  компоненты электрического поля, температуры и давления солнечного ветра, чем «полярные» суббури.

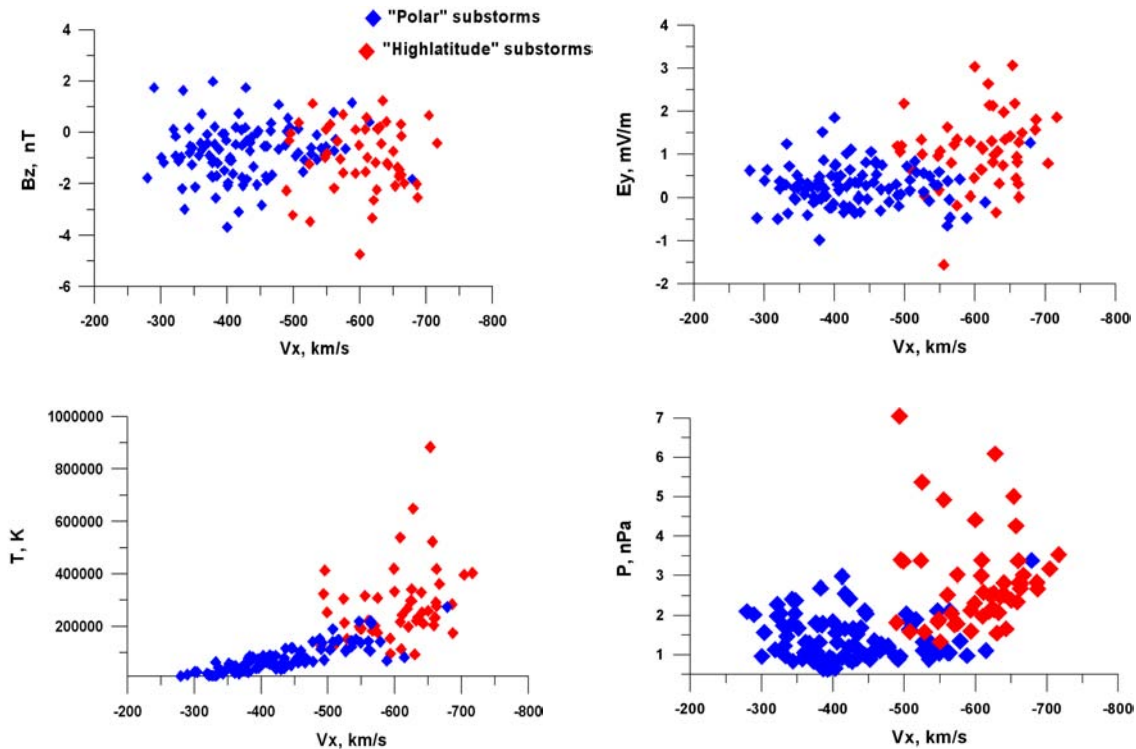


Рисунок 3. Параметры солнечного ветра  $V_x$ ,  $B_z$ ,  $E_y$ ,  $T$ ,  $P$ , усредненные за полтора часа перед началом «полярных» (синие ромбы) и «высокоширотных» (красные ромбы) суббурь

Были рассчитаны также возмущения (среднеквадратичные отклонения) для всех рассматриваемых параметров солнечного ветра ( $V_x$ ,  $B_z$ ,  $E_y$ ,  $T$ ,  $P$ ) перед появлением этих 2-х типов суббурь. Оказалось, что возмущения параметров солнечного ветра больше для «высокоширотных» суббурь, чем для «полярных» суббурь (рисунок не представлен здесь).

## Выводы

Проведен сравнительный анализ условий появления суббурь на высоких геомагнитных широтах. Показано, что суббури, для которых возмущения есть только на широтах  $>70^\circ$ , наблюдаются при низкой скорости солнечного ветра, после прохождения высокоскоростного рекуррентного потока, на поздней восстановительной фазе геомагнитной бури. Суббури, во время которых возмущения перемещаются из авроральных ( $<70^\circ$ ) в полярные ( $>70^\circ$ ) широты,

наоборот, наблюдаются при высокой скорости солнечного ветра, повышенных значениях  $V_z$ ,  $E_y$ , температуры и давления солнечного ветра, во время прохождения мимо Земли высокоскоростного рекуррентного потока.

### Благодарности

Работа выполнена в рамках программы Президиума РАН № 22 «Фундаментальные проблемы исследований и освоения Солнечной системы», частичной поддержке гранта РФФИ 12-05-01030. Работа является также частью исследований в рамках Соглашения между РАН и БАН в области фундаментальных космических исследований, проект 2-14.

### References:

1. Akasofu, S.I. The development of the auroral substorm. *Planet. Space Sci.*, 12, .273 –282, 1964.
2. Troshichev, O.A., Kuznetsov, B.M., Pudovkin, M.I. The current systems of the magnetic substorm growth and explosive phase. *Planet. Space Sci.* .22, 1403 –1412, 1974.
3. Kisabeth, J.L., Rostoker, G. The expansive phase of magnetospheric substorms. Development of the auroral electrojets and auroral arcs configuration during substorm. *J. Geophys. Res.* 79, 972 –984, 1974.
4. Wiens, R.G., Rostoker, G. Characteristics of the development of the westward electrojet during the expansive phase of magnetospheric substorms. *J. Geophys. Res.* 16, 2109 –2128, 1975.
5. Sergeev, V.A., Yahnin, A.G. The features of auroral bulge expansion. *Planet. Space Sci.* 27, 1429 – 1440, 1979.
6. Клейменова, Н.Г., Антонова, Е.Е., Козырева, О.В., Малышева, Л.М., Корнилова, Т.А., Корнилов, И.А. Волновая структура магнитных суббурь в полярных широтах. *Геомагнетизм и аэрономия.* 52, 785-793, 2012.
7. Сергеев, В.А., Яхнин, А.Г., Дмитриева, Н.П. Суббури в полярной шапке - эффект высокоскоростных потоков солнечного ветра. *Геомагнетизм и аэрономия.* 19, 1121-1122, 1979.
8. Yahnin, A.G., Despirak, I.V., Lubchich, A.A., Kozelov, B.V. Solar wind control of the auroral bulge expansion. *Proceedings of the 7th International Conference on Substorms, Helsinki*, 31 –33. 2004.
9. Дэспирак, И.В., Любчич, А.А., Биернат, Х.К., Яхнин, А.Г. Полярная экспансия суббурового западного электроджета в зависимости от параметров солнечного ветра и межпланетного магнитного поля. *Геомагнетизм и аэрономия.* 48, 297-305, 2008.
10. Feldstein, Y. I., Starkov, G. V. Dynamics of auroral belt and geomagnetic disturbances. *Planet. Space Sci.* 15, 209, 1967.
11. Akasofu, S.-I., Wilson, C. R., Snyder, A.L., Perreault, P.D. Results from a meridian chain of observations in the Alaskan sector, 1. *Planet. Space Sci.*, 19, 497, 1971.
12. Akasofu, S.-I., Perreault, P.D., Yasuhara, F., Meng, C.-I. Auroral substorms and the interplanetary magnetic field. *J. Geophys. Res.* 78, 7490, 1973.
13. Lui, A. T. Y., Anger, C.D., Akasofu, S.-I. The equatorward boundary of the diffuse aurora and auroral substorms as seen by the Isis 2 auroral scanning photometer. *J. Geophys. Res.* 80, 3603 - 3614 , 1975.
14. Lui, A. T. Y., Akasofu, S.-I., Hones, E.W., JR., Bame, S.J., Mclwan, C.E. Observation of the plasma sheet during a contracted oval substorm in a prolonged quiet period. *J. Geophys. Res.* 81, 1415-1419, 1976.
15. Akasofu, S.I. Several “controversial” issues on substorms. *Space Sci. Rev.* 113, 1 – 40, 2004.
16. Gupta, J.C., Loomer, E.I. Influence on AE index of substorms appearing north of Cambridge Bay. *Planet. Space Sci.* 27, 1019 –1025, 1979.
17. Loomer, E.I., Gupta, J.C. Some characteristics of high latitude substorms. *J. Atmos. Terr. Phys.* 42, 645 – 652, 1980.
18. Doolittle, J.H., Mende, S.B., Frey, H.U., Rosenberg, T.J., Weatherwax, A.T., Lanzerotti, L.J., MacLennan, C.G., Arnoldy, R.L., Engebretson, M.J., Fukunishi, H., Inan, U.S. Substorm auroral expansion to high latitudes and the dawn/dusk flanks. In: Kokubun S. and Kamide Y. (Eds). *Substorm- 4. Terra Publ. Tokio.* 47 –50, 1998.
19. Kuznetsov, S., Lazutin, L.L., Rosenberg, T., Borovkov, L., Gotselyuk, Yu., Weatherwax, A. Energetic electron and ion dynamics and polar aurora during magnetospheric substorm of March 10, 1994. In: Wilson A. (Ed). *Substorm- 5. St. Petersburg. ESA SP- 443*, 511 –514, 2001.
20. Mende, S.B., Frey, H.U., Geller, S.P., Doolittle, J.H. Multistation observations of auroras: Polar cap substorms. *J. Geophys. Res.* 104, 2333 –2342, 1999.
21. Weatherwax, A.T., Rosenberg, T.J., MacLennan, C.G., Doolittle, J.H. Substorm precipitation in the polar cap and associated Pc5 modulation. *Geophys. Res. Lett.* 24, 579 –582. 1997.
22. Gussenhoven, M.S. Extremely high latitude auroras. *J. Geophys. Res.* 87, 2401 –2412, 1982.
23. Дмитриева, Н.П., Сергеев, В.А. Появление авроральной электроструи на широтах полярной шапки: характеристики явления и возможность его использования для диагностики крупномасштабных высокоскоростных потоков солнечного ветра. *Магнитосферные исследования.* № 3. 58-66, 1984.
24. Despirak, I.V., Lubchich, A.A., Yahnin, A.G., Kozelov, B.V., Biernat, H.K. Development of substorm bulges during different solar wind structures. *Ann. Geophys.* 27, 1951 –1960, 2009.
25. Despirak, I.V., Lubchich, A.A., Guineva, V. Development of substorm bulges during storms of different interplanetary origins. *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* 73, 1460–1464, 2011.
26. Pudovkin, M.I., Semenov, V.S., Kotikov, A.L., Shishkina, E.M. Dynamics of auroral electrojets and energetics of substorm. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 57, 187 –192, 1995.