

# СРАВНЕНИЕ ГРАНИЦ И ПЛОЩАДИ ПОЛЯРНОЙ ШАПКИ, ОПРЕДЕЛЕННЫХ НА ОСНОВЕ ТЕХНИКИ ИНВЕРСИИ МАГНИТОГРАММ, ИЗОБРАЖЕНИЙ ПОЛЯРНЫХ СИЯНИЙ И МГД-МОДЕЛИРОВАНИЯ

Ю.А. Караваев<sup>1</sup>, В.М.Мишин<sup>1</sup>, С.Б. Лунюшкин<sup>1</sup>, У. Сухбаатар<sup>2</sup>, А. В. Моисеев<sup>3</sup>, Д.Ш. Ширапов<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия

<sup>2</sup> Исследовательский центр астрономии и геофизики МАН, Улаан-Баатар, Монголия

<sup>3</sup> Институт космофизических исследований и аэронавтики им. Ю.Г. Шафера СО РАН, Якутск, Россия

<sup>4</sup> Восточно-Сибирский государственный технологический университет, Улан-Удэ, Россия

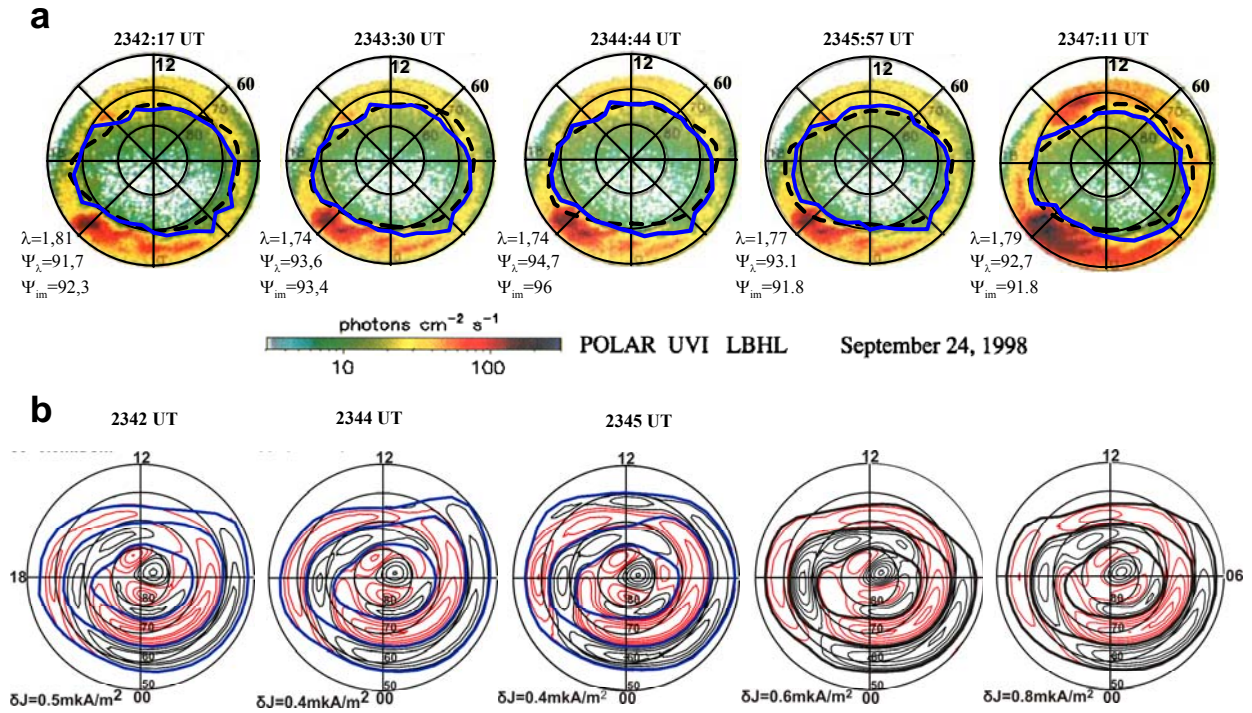
**Аннотация.** Выполнено сравнение границ и площади полярной шапки (ПШ), полученных двумя независимыми методами по данным пяти моментов бури 24.09.1998. Первый метод основан на наземных магнитных измерениях, обработанных с помощью техники инверсии магнитограмм (ТИМ) второй – на измерениях UV эмиссии на борту s/c Polar. Абсолютное среднеквадратичное отклонение (RMS) широты границ, полученных первым и вторым методом - менее 2°, отношение RMS к средней широте ПШ – менее 3%. Вычислены также значения магнитного потока  $\Psi$  через ПШ, полученные каждым методом. RMS разностей двух названных значений  $\Psi$  - менее 2 %.

## 1. Введение

Доли хвоста магнитосферы – две связки магнитных силовых линий, которые замыкаются в солнечном ветре (СВ). Каждая связка содержит магнитный поток  $\Psi=BS$ , где  $B=60000$ нТ - магнитное поле в полярной шапке (ПШ),  $S$  – площадь одной из двух ПШ, пересекаемая потоком  $\Psi$ . Известен ряд независимых способов определения границ и площади ПШ [e.g., Stern and Alekseev, 1988; Mishin et al., 1992; 2001; 2013; Maltsev and Ostapenko, 2004; Shukhtina et al., 2004; 2005; Milan et al., 2003; 2007]. Определив границу ПШ и площадь  $S$ , вычисляют  $\Psi$ . Поток электромагнитной энергии из СВ в магнитосферу есть  $\varepsilon=C\cdot\Psi_1^2V$ , где  $C$  – эмпирическая постоянная,  $V$  – скорость СВ,  $\Psi_1$  – переменная часть полного потока  $\Psi$ , создаваемая суммарным действием процессов пересоединения на магнитопаузе, в ближнем и дальнем хвосте [e.g., Mishin and Falthammar, 1998; Milan, 2008]. Полный поток  $\Psi=\Psi_1+\Psi_0$ , где  $\Psi_0$  – значение  $\Psi$  в спокойное время перед рассматриваемым возмущением. Три производные по времени от  $\Psi$ ,  $\Psi_1$  и  $\Psi_0$  все имеют разный физический смысл. В частности,  $d\Psi_1/dt=0.5(U_D+U_N)=U_{PC}$ , где  $U_D$  и  $U_N$  - скорости пересоединения на дневной магнитопаузе и в дальнем хвосте, соответственно, а  $U_{PC}$  – разность потенциалов на границе ПШ [Siscoe and Huang, 1985; Cowley and Lockwood, 1992]. Можно видеть, что поток  $\Psi$  и его компоненты  $\Psi_1$  и  $\Psi_0$ , входят в ряд немногих ключевых параметров физики магнитосферы. Поэтому, нахождению из данных наблюдений границы ПШ, параметров  $\Psi$ ,  $\Psi_1$  и  $\Psi_0$ , и изучению их динамики в ходе магнитосферных возмущений посвящена обширная литература [e.g., Craven and Frank, 1987; Newell et al., 1997; Kauristie et al., 1999; Baker, 2000; Clauer et al., 2001; Zhou et al., 2001; Milan et al., 2007]. Эти факты определяют мотивацию и основную задачу настоящей статьи. Задача сводится к сравнению результатов нового метода определения границы ПШ и магнитного потока  $\Psi$  на основе техники инверсии магнитограмм (ТИМ) [Mishin, 1990; 2001; 2013], с соответствующими данными от UVI images. Последние были получены на борту s/c Polar [Ostgaard and Mende, et al., 2006], использованы ранее в работах Clauer et al., [2001] и Zhou et al., [2001].

## 2. Методы

UVI images, использованные в настоящем кратком сообщении, взяты из статьи Zhou et al. [2001] и показаны в верхней панели Рис. 1. Распределение UVI эмиссии, кодированное цветными тонами представлено в магнитной системе координат с центром в магнитном полюсе. В нижней панели даны в той же системе координат карты распределения в 2D ионосфере плотности продольных токов ( $IT=FACs$ ), вычисленные на основе ТИМ. Красные изолинии (черные) соответствуют продольному току, втекающему downward (вытекающему upward) из ионосферы. На картах распределения UVI показаны две границы. Синяя сплошная линия – граница UV эмиссии, соответствующая уровню  $\sim 20$  photons  $cm^{-2} s^{-1}$  в области выше этой границы, и пунктирная черная линия - по данным высокоширотной сети наземных магнитометров с помощью ТИМ. Приведены также значения коэффициента сжатия ПШ,  $\lambda$ , и значения  $\Psi$ , полученные двумя методами.



**Рис. 1 а)** Пример сравнения двух границ полярной шапки (ППШ), определённых по данным бури 24.09.1998. Одна граница, показанная сплошной синей линией, определена по данным POLAR UVI (по уровню яркости приблизительно 20 фотонов / (см-2с-1) [Zhou, 2001]. Вторая граница (пунктирная черная линия) определена на наших картах ПТ. **б)** - распределение в ионосфере плотности продольных токов (ПТ). Координаты геомагнитные - широта (выше 50 градусов) и местное время. Красными линиями показаны изолинии плотности втекающих ПТ, черные линии - изолинии плотности вытекающих из ионосферы ПТ, жирные синие линии - границы ПШ и Зон 1 и 2 Ийджимы и Потемры. Граница ПШ совпадает с высокоширотной границей втекающего ПТ Зоны 1 в утреннем и вытекающего ПТ в вечернем секторе.

Граница ПШ, показанная черной пунктирной линией на панели 1а, имеет тот же смысл, что и околюполюсная граница на карте плотности ПТ (1б). Последняя проведена в соответствии с правилом Ийджимы и Потемры [Potemra, 1994]. В утреннем секторе эта граница разделяет область R1 втекающего в ионосферу downward ПТ и область R0 вытекающего upward ПТ. В вечернем секторе граница ПШ разделяет вытекающий ПТ области R1 и втекающий ПТ области R0.

Значения плотности ПТ вычислены в полярной области по сети точек с расстояниями  $1^\circ$  по широте и  $10^\circ$  по MLT, что грубо соответствует пространственному распределению наземных магнитометров, данные которых используются на входе ТИМ. В настоящей работе использовалась сеть из 110 магнитометров, показанная на Рис. 2. Как и все выходные данные ТИМ, карты распределения плотности ПТ получены на основе разложения потенциала переменного геомагнитного поля в усечённый ряд сферических функций  $P_n^m$  (MLAT, MLT).

В настоящей работе на первом этапе использовался ряд со значениями  $n=26$  и  $m=4$ , из которого затем отбирался оптимальный спектр аппроксимирующих функций путём фильтрации относительно высоких гармоник, вклад которых был ниже заданной ошибки аппроксимации. Фильтрация создаёт сглаживающий эффект. Поэтому на следующем этапе выполнялось вторичное разложение потенциала с максимальными значениями  $n=50$ ,  $m=4$ , на основе которого определяется сглаживающий множитель  $\lambda$ , значения которого показаны на картах ПТ. Упомянутые значения  $n=26$  и  $m=4$  являются предельно возможными из-за скачкообразного роста ошибок вычисления при  $n \geq 50$ ,  $m \geq 4$ . Поэтому можно ожидать, что площадь ПШ на приведённых картах ПТ будет скорее занижена (ПШ сжата), чем завышена. Проверка корректности применяемого в рамках ТИМ коэффициента сжатия вычисленной площади ПШ – попутная, но важная, цель настоящей работы. Ещё одна попутная цель связана с тем, что на основе многолетних применений ТИМ мы принимаем характерную величину ошибки определения границы ПШ равной  $\sim 0.04$  GWb. Эта оценка совпадает с заявленной точностью определения границы ПШ в МГД модели Wang et al. [2013], но обе оценки требуют проверки, т. к. они были найдены без сравнения вычисленных границ ПШ с эталоном, полученным на основе данных прямых измерений, подобных данным UVI Polar. Другие детали метода определения границы ПШ и магнитного потока  $\Psi$ , вычисленных на основе ТИМ, см. в статье Mishin et al. [2011].

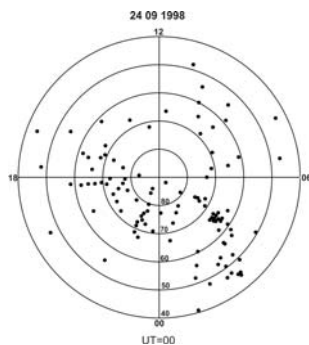


Рис. 2

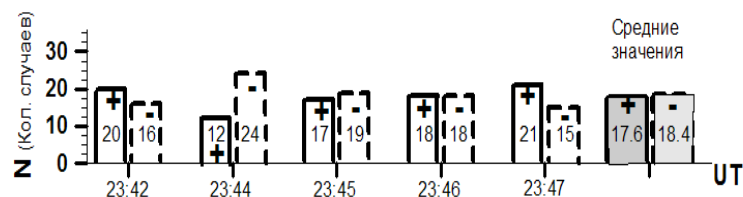


Рис. 3

Рис. 2 Карта расположения наземных магнитометров в координатах MLAT, MLT

Рис. 3 Статистическое распределение разности широт  $\Delta\Phi = \Phi_1 - \Phi_2$ , где индекс 1 (2) относится к данным ТИМ (UVI Polar).

### 3. Результаты

В Таблице 1 приведены значения относительных (RMS) и абсолютных ( $RMS / \langle \Phi \rangle$ , %) средне квадратичных отклонений широты границ ПШ, полученных двумя сравниваемыми методами на каждом из 36 равномерно распределённых меридианов MLT. Вычислены коэффициенты корреляции между  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$  и величины открытого магнитного потока, для двух методов, а также разности широт  $\Delta\Phi = \Phi_1 - \Phi_2$ , где индекс 1 (2) относится к данным ТИМ (UVI Polar).

**Таблица 1.** Статистические параметры модулей разности  $\Delta\Phi = \Phi_1 - \Phi_2$  - границ ПШ, полученных на основе ТИМ и UV- имиджей на борту c/s Polar. Рассмотрены 5 моментов интервала (2342-2353) UT, 24.09.1998

UT	23:42	23:44	23:45	23:46	23:47
RMS of $\Delta\Phi$ , degrees	1,7	2,1	2,1	1,8	2,2
RMS of $\Delta\Phi / \langle \Phi \rangle$ , %	2.4	2.9	2.9	2.5	3.1
C, correlation coefficient between $\Phi_1$ и $\Phi_2$	0.85	0.83	0.82	0.88	0.80
$\Psi_1$ , ( $10^7$ Wb)	91.7	93.4	95.9	93.1	91.7
$\Psi_2$ , ( $10^7$ Wb)	92.3	94.8	96.0	94.2	92.4
AE, nT	959	1055	1054	1600	2033

Примечания. 1.  $\langle \Phi \rangle$  - средняя для каждого из 5 моментов широта границы ПШ.

2.  $\Psi_1$  и  $\Psi_2$  - значения открытого магнитного потока. Индексы 1 и 2 относятся к данным ТИМ и UVI Polar; AE – индекс магнитной активности.

Дополнительно получены диаграммы статистического распределения положительных и отрицательных значений  $\Delta\Phi$  для 5 моментов в диапазоне (2342-2347) UT, характеризующих корректность, или некорректность использованного коэффициента сжатия ПШ,  $\lambda$  (Рис. 3). На основе полученных результатов мы делаем следующие выводы.

1. RMS разностей широты границы ПШ первого и второго метода не превышают  $2^\circ$ .
2. Отношение RMS значений  $\Delta\Phi$  к средней широте ПШ (коэффициент различия, вариант, C.V.) не превышают 3%.
3. RMS значений открытого магнитного потока,  $\Psi$ , полученных двумя сравниваемыми методами, не превышает 10%.
4. Данные Рис. 3 подтверждают корректность используемого в рамках ТИМ коэффициента  $\lambda$ , хотя из-за малого объёма статистики требуется дополнительное исследование.

В целом, приведены обещающие результаты, которые свидетельствуют о конкурентоспособности ТИМ по сравнению с другими известными методами определения границы ПШ и магнитного потока  $\Psi$ . Выводы получены на малом объёме наблюдений, требуются дополнительные исследования.

Авторы благодарят В.В. Мишина, А. Базаржапова за полезные дискуссии; Л. Сапронову, М. Толочко – за техническую помощь. Входные данные ТИМ получены: параметры солнечного ветра – сайт [cdaw.gsfc.nasa.gov](http://cdaw.gsfc.nasa.gov); данные наземных магнитометров – от Дж. Ватермана (ДМИ, Дания), А. Вилайна

(проект IMAGE), Т. Иуемори (WDC\_C2, Киото), Дж. Посч (проект MACCS), О.А. Трошичева (ААНИИ), Е.П. Харина (МЦД-Б), Б.М. Шевцова и А.В. Винницкого (ИКИР), С. Хомутова (обс. “Новосибирск”), О. Кусонского (обс. “Арти”) и руководителей проектов INTERMAGNET, CANOPUS, GIMA (Университет Аляски). Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты №№: 12-05-91159-ГФЕН, 13-05-92219-МОНГ, 12-05-98522 и 13-05-00363).

### Список литературы

- Baker, J. B., C. R. Clauer, A. J. Ridley, V. O. Papitashvili, M. J. Brittner, and P. T. Newell (2000), The nightside poleward boundary of the auroral oval as seen by DMSP and the Ultraviolet Imager, *J. Geophys. Res.*, 105.
- Clauer, C. R., I. I. Alexeev, E. S. Belenkaya, and J. B. Baker (2001), Special features of the September 24–27, 1998 storm during high solar wind dynamic pressure and northward interplanetary magnetic field, *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 106(A11), 25695-25711.
- Cowley, S. W. H., and M. Lockwood (1992), Excitation and decay of solar-wind driven flows in the magnetosphere-ionosphere system, *Ann. Geophys.*, 10, 103-115.
- Craven, J. D., and L. A. Frank (1987), Latitudinal motions of the aurora during substorms, *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 92(A5), 4565-4573.
- Kauristie, K., J. Weygand, T. I. Pulkkinen, J. S. Murphree, and P. T. Newell (1999), Size of the auroral oval: UV ovals and precipitation boundaries compared, *J. Geophys. Res.*, 104(A2), 2321-2331.
- Maltsev, Y. P., and A. A. Ostapenko (2004), Azimuthally asymmetric ring current as a function of D-st and solar wind conditions, *Annales Geophysicae*, 22(8), 2989-2996.
- Milan, S. E., G. Provan, and B. Hubert (2007), Magnetic flux transport in the Dungey cycle: A survey of dayside and nightside reconnection rates, *J. Geophys. Res.*, 112(A1), A01209.
- Milan, S. E., P. D. Boakes, and B. Hubert (2008), Response of the expanding/contracting polar cap to weak and strong solar wind driving: Implications for substorm onset, *J. Geophys. Res.*, 113.
- Milan, S. E., M. Lester, S. W. H. Cowley, K. Oksavik, M. Brittner, R. A. Greenwald, G. Sofko, and J. P. Villain (2003), Variations in the polar cap area during two substorm cycles, *Ann. Geophys.*, 21(5), 1121-1140.
- Mishin, V. M. (1990), The magnetogram inversion technique and some applications, *Space Science Reviews*, 53(1), 83-163.
- Mishin, V. M., and C.-G. Falthammar (1998), Pseudo and true substorm onsets within framework of the analogy, magnetospheric substorms-solar flares., in *International Conference on Substorms-4, Proceedings of the Fourth International Conference on Substorms (ICS-4), Lake Hamana, Japan, 9-13 March 1998*/edited by S. a. C. Y. Kokubun, pp. 319-322, Terra Scientific publishing Company / Kluwer academic Publishers, , Tokyo, Dordrecht, London, Boston.
- Mishin, V. M., V. V. Mishin, and S. B. Lunyushkin (2013), Short-Circuit in the Magnetosphere-Ionosphere Electric Circuit, *Geomagnetism and Aeronomy*, 53(6), 858–860.
- Mishin, V. M., Y. A. Karavaev, L. A. Saponova, and S. I. Solovyev (2011), Electric field screening of the polar cap according to data on the magnetospheric superstorm of 20 november 2003, *Solnechno-Zemnaya Fizika*(19), 46-54.
- Mishin, V. M., T. Saifudinova, A. Bazarzhapov, C. T. Russell, W. Baumjohann, R. Nakamura, and M. Kubyskhina (2001), Two distinct substorm onsets, *J. Geophys. Res.*, 106(A7), 13105-13118.
- Mishin, V. M., A. D. Bazarzhapov, T. I. Saifudinova, S. B. Lunyushkin, D. S. Shirapov, J. Woch, L. Eliasson, H. Opgenoorth, and J. S. Murphree (1992), Different Methods to Determine the Polar Cap Area, *Journal of geomagnetism and geoelectricity*, 44(12), 1207-1214.
- Newell, P. T., D. Xu, C.-I. Meng, and M. G. Kivelson (1997), Dynamical polar cap: A unifying approach, *J. Geophys. Res.*, 102(A1), 127-139.
- Østgaard, N., S. B. Mende, H. U. Frey, J. B. Sigwarth, A. Åsnes, and J. M. Weygand (2007), Auroral conjugacy studies based on global imaging, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 69(3), 249-255.
- Shukhtina, M. A., N. P. Dmitrieva, and V. A. Sergeev (2004), Quantitative magnetotail characteristics of different magnetospheric states, *Ann. Geophys.*, 22(3), 1019-1032.
- Shukhtina, M. A., N. P. Dmitrieva, N. G. Popova, V. A. Sergeev, A. G. Yahnin, and I. V. Despirak (2005), Observational evidence of the loading-unloading substorm scheme, *Geophys. Res. Lett.*, 32(17), L17107.
- Siscoe, G. L., and T. S. Huang (1985), Polar Cap Inflation and Deflation, *J. Geophys. Res.*, 90(A1), 543-547.
- Stern, D. P., and I. I. Alexeev (1988), Where do field lines go in the quiet magnetosphere?, *Reviews of Geophysics*, 26(4), 782.
- Wang, C., Z. Y. Xia, Z. Peng, and Q. M. Lu (2013), Estimating the open magnetic flux from the interplanetary and ionospheric conditions, *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 118(5), 1899-1903.
- Zhou, X., and B. T. Tsurutani (2001), Interplanetary shock triggering of nightside geomagnetic activity: Substorms, pseudobreakups, and quiescent events, *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 106(A9), 18957-18967.