

УДК 550.385

ДИНАМИКА МАГНИТНОГО ПОТОКА ДОЛЕЙ ХВОСТА МАГНИТОСФЕРЫ ЗЕМЛИ В ХОДЕ СУПЕРБУРИ 29.10.2003 г.

А.А. Шаповалова (Шейфлер), М.В. Толочко, Ю.А. Караваев

DYNAMICS OF TAIL LOBE MAGNETIC FLUX IN THE EARTH'S MAGNETOSPHERE DURING THE SUPERSTORM OF 29.10.2003

A.A. Shapovalova (Sheifler), M.V. Tolochko, Yu.A. Karavaev

Мы использовали данные супербури 29.10.2003 г., сильнейшей в 23-м цикле солнечной активности. Анализ выполнен на основе метода ТИМ, созданного в ИСЗФ, который позволяет определять значения Ψ по картам продольных токов, получаемым с шагом 1 мин и погрешностью порядка $\sim 10\%$. Мы апробировали новый метод определения границ полярной шапки и магнитного потока Ψ . Определили значения Ψ_0 . Наши данные подтверждают насыщение на уровне $\Psi \geq 1.2 \cdot 10^9$ Вб при $E_m < 80$ мВ/м. Получены графики изменения энергии и мощности возмущения, из которых следуют нетривиальные результаты.

We used the 29.10.2003 superstorm data, the strongest in 23 solar activity cycles. The analysis is performed on the basis of MIT method that is created in ISTP and allows determining the Ψ values by using the maps of the field-aligned currents with the steps 1 minute and errors $\sim 10\%$. We tested a new method for determining the boundaries of the polar cap and the magnetic flux Ψ . Determined values Ψ_0 . Our data support the saturation level $\Psi \geq 1.2 \cdot 10^9$ Weber for $E_m < 80$ mV/m. Diagrams of changes in energy and power disturbance resulting from non-trivial results.

Введение

Открытые силовые линии соединяют магнитосферу и ионосферу Земли с солнечным ветром (СВ). Поток открытых силовых линий Ψ пересекает площадь S полярной шапки (ПШ) и может быть определен как $\Psi = BS$, если известны эта площадь и магнитное поле B внутри ПШ.

Магнитный поток Ψ переносит в доли хвоста и далее в магнитосферу и ионосферу электрический потенциал СВ и поток электромагнитной энергии (поток Пойнтинга $\epsilon' = \text{const} \Psi_1^2 V_{\text{СВ}}$). Установлено, что $\Psi = \Psi_1 + \Psi_0$, где Ψ_1 и Ψ_0 – слагаемые сравнимой величины, Ψ_1 – переменное, а Ψ_0 (значение полного потока в спокойное время перед суббурей) – постоянное слагаемое. В литературе активно обсуждается проблема динамики Ψ в ходе магнитосферных бурь. Накопленные сведения неполны и противоречивы. Наша работа основана на мониторинге границ ПШ с помощью техники инверсии магнитограмм (ТИМ), созданной в ИСЗФ [Mishin, 1990]. Этот метод обеспечивает вычисление временных рядов значений Ψ . Наша работа посвящена трем нерешенным задачам, относящимся к названной проблеме:

- 1) методу определения Ψ и Ψ_0 ;
- 2) спорному вопросу о том, является ли Ψ линейной функцией электрического поля СВ, или рост Ψ прекращается на уровне ~ 1 ГВб;
- 3) вычислению мощности и энергии магнитосферных возмущений на основе полученной базы данных Ψ , Ψ_0 .

1. Метод определения границы полярной шапки и параметров Ψ , Ψ_0

Известны три основных статистических модели распределения в ионосфере плотности продольных токов (ПТ). В модели Ииджимы и Потемры (модель И–П) 70-х гг. XX в. ПТ разделены на три пространственные зоны И–П, вложенные одна в другую [Iijima, Potemra, 1978; Potemra, 1994]. В каждой зоне втекаю-

щий ПТ преобладает в одном (утреннем или вечернем) секторе, а вытекающий в другом, разделяющая граница совпадает с меридианом. Выделение зон позволяет связать наблюдаемые пространственные особенности ПТ с известными особенностями соответствующих областей магнитосферы и включить зоны И–П в общий контекст физики магнитосферы. Две другие модели ПТ, созданные в XXI в. [Papitashvili et al., 2002; Weimer, 2001], основаны на более точных и полных измерениях, но не имеют пространственных структур, и потому в их описании физика магнитосферы отсутствует, описание остается чисто феноменологическим.

На рис. 1 слева показаны карты распределения плотности ПТ в ионосфере по данным 29.10.2003 г.: изолинии втекающих (пунктир) и вытекающих (тонкие сплошные линии) ПТ. На рис. 1 справа показаны границы зон (черная толстая кривая). Можно видеть, что в выбранный момент времени 06:12 UT определение границ зон по методу И–П не работает на самых интересных участках вблизи полуночи и полудня, где на одном меридиане мы видим не три, а четыре ПТ разного знака. Такие случаи встречаются часто.

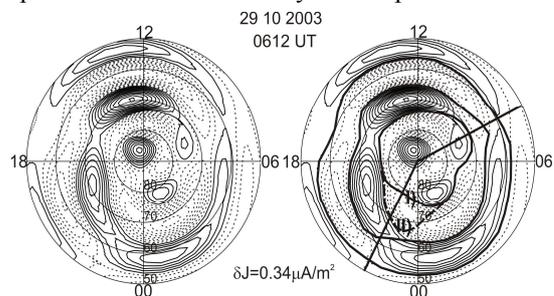


Рис. 1. Распределение в ионосфере плотности продольных токов. Использована геомагнитная система координат: широта ($\Phi \geq 50^\circ$) и местное время. Изолинии плотности втекающих ПТ (пунктир), вытекающих ПТ (тонкие сплошные линии), границы трех зон Ииджимы и Потемры (сплошные жирные линии). Жирными прямыми выделены меридианы, вдоль которых возникают сложности в проведении границ ПШ.

Поэтому в упомянутых моделях XXI в. метод И–П не использовался.

В работах [Караваяев и др., 2011; Mishin et al., 2011] введены дополнительные критерии определения границ и площадей зон ПТ, основанные на определенных положениях современной физики магнитосферы. Они обеспечивают оптимальный выбор между пробными границами типа I (жирная кривая) и II (штриховая линия, рис. 1). Благодаря этому сохраняется основа трехзональной модели И–П и объединяются преимущества как этой модели, так и моделей типа моделей Веймера и Папиташвили.

2. Проблема Ψ_0

Оценки Ψ_0 , полученные в работах разных научных коллективов, расходятся в разы [Newell et al., 1997; 2001; Milan, 2003; 2007; Shukhtina, 2004; 2005; Stern, Alekseev, 1988; Troshichev, Nishida, 1992]. Полученная нами оценка Ψ_0 как наименьшего значения Ψ за рассмотренный интервал 04:00–09:00 UT 29.10.2003 г. составляет 0.42 ГВб. По двум другим супербурям 20.11.2003 и 06.04.2000 г. после ряда проб получены значения 0.38 и 0.36 ГВб соответственно. Для сравнения, по данным группы [Milan et al., 2003; 2007] значения Ψ_0 лежат в интервале 0.2–0.4 ГВб, а в модели [Shukhtina et al., 2004; 2005] $\Psi=0.87 + 0.12 E_m$. Таким образом, наши значения Ψ_0 не противоречат

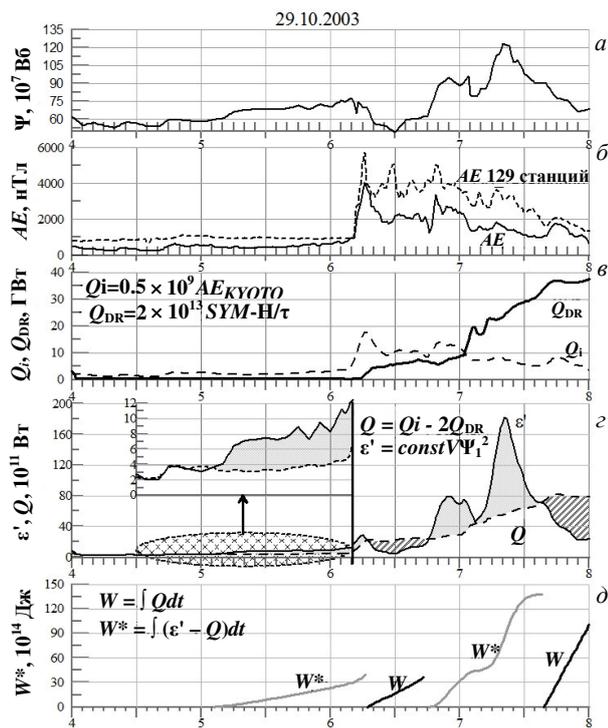


Рис. 2. Основные энергетические параметры супербури 29.10.2003 г.: а – график зависимости магнитного потока Ψ от UT; б – AE-индексы, рассчитанные по данным 129 станций, расположенных по широте выше 50° (пунктир), и AE-индексы от WCD Kyoto (сплошная); в – значения мощности возмущения, выделяемой в ионосфере (Q_i) и в кольцевом токе во внутренней магнитосфере (Q_{DR}) (рассчитаны согласно [Gonzalez et al., 1974; Ostgaard et al., 2002]); г – поток Пойнтинга ϵ' и полная мощность Q ; серой заливкой обозначена область положительных значений разности $\epsilon' - Q$, штриховкой – область отрицательных значений; д – запасенная и выделяемая энергии W^* и W .

результатам группы Милана, но вдвое меньше, чем в модели Шухтиной. Соответствующие значения потока энергии $\epsilon' = const \Psi_1^2 V_{CB}$, вычисленного по данным Шухтиной, будут в разы меньше, чем при использовании нашего метода.

3. Линейная зависимость $\Psi(E_m)$ или насыщение Ψ ?

Шухтина с соавторами пришли к выводу, что значение Ψ_1 , определяющее поток Пойнтинга ϵ' , увеличивается с ростом электрического поля E_m по приведенному выше линейному закону. Этот важный вывод не согласуется с результатами [Lopez et al., 2009], из которых следует, что значение Ψ перестает расти, испытывая насыщение вблизи 1 ГВб, при достижении уровня электрического поля СВ $E_m = 10$ мВ/м, характерного для бурь средней интенсивности. В нашей базе данных по супербуре 29.10.2003 г. значения E_m охватывали интервал $80 \text{ мВ/м} < E_m$. Полученные данные указывают скорее на наличие эффекта насыщения Ψ , чем на линейную связь Ψ с E_m СВ.

4. Энергия и мощности супербури по данным Ψ, Ψ_0

Рассмотрим теперь набор основных показателей энергетики супербури (рис. 2). Новые нетривиальные данные (рис. 2) следующие:

1. На рис. 2, б верхний график соответствует дневным, нижний – ночным AE-индексам активности. Видно, что дневная активность выше ночной, и это является неожиданным и важным результатом, характеризующим ранее неизвестную особенность супербури.

2. Два графика на рис. 2, в показывают изменения Q_i и Q_{DR} , и это является вторым нетривиальным результатом: после 07 UT $Q_i < Q_{DR}$.

3. Два графика на рис. 2, г показывают области, для которых поступающая в магнитосферу мощность ϵ' больше, чем расходуемая мощность Q (серая область), и наоборот (заштрихованная область). Третий результат, полученный впервые: супербуря состоит из чередующихся циклов загрузка/разгрузка с характерным временем порядка часа и амплитудой от 0 до $2 \cdot 10^{16}$ Дж (рис. 2, д)

4. Площади серой и заштрихованной областей совпадают в пределах 5 %, что не превышает ожидаемой неустраняемой ошибки методов вычисления Q и ϵ' . Таким образом, полученные результаты не вступают в противоречие с законом сохранения энергии.

Основные результаты и выводы

1. Протестирован новый метод определения границ полярной шапки и магнитного потока Ψ долей хвоста магнитосферы Земли, и на его основе описаны изменения Ψ в ходе супербури 29.10.2011 г., сильнейшей в 23-м цикле солнечной активности. Определены значения важной константы Ψ_0 , относительно которой в литературе существуют разногласия.

2. Показано, что в ходе активной фазы упомянутой супербури наблюдалась нелинейная зависимость Ψ от E_m СВ, но имели место признаки насыщения Ψ на уровне ~ 1.2 ГВб.

3. На основе данных по Ψ , Ψ_0 получены графики изменений индексов активности, энергии и мощности возмущения в ходе рассмотренной супербури. Получен ряд нетривиальных результатов, в частности, впервые выделены интервалы преобладающей загрузки и преобладающей разгрузки магнитосферы.

В докладе приведены предварительные результаты. Анализ продолжается.

Авторы благодарят профессора В.М. Мишина за постановку задачи и полезные обсуждения. Авторы благодарны также сотрудникам команды ТИМ ИСЗФ СО РАН В.В. Мишину, А.Д. Базаржапову, Т.И. Сайфудиновой, Л.А. Сапроновой за плодотворные дискуссии и техническую помощь.

Мы благодарим также руководителей проекта INTERMAGNET, World Data Center for Geomagnetism (WDC-2), Kyoto, за предоставленные индексы *AE* и *SUM-N* и коллег, выславших нам входные данные ТИМ: D. McComas, P. Lepping, K. Ogilvie, J. Stenberg and A. Lasarus (данные WIND); H. Gleisner (DMI, Дания), A. Viljanen (проект IMAGE), K. Yumoto (проект 210), T. Iyemori (WDC-C2, Kyoto), J. Posch (проект MACCS), О.А. Трошичева (ААНИИ, Санкт-Петербург), Е.Р. Kharin (WDC-B), С.И. Соловьева (Якутск), Б.М. Шевцова и А.В. Винницкого (ИКИР), GIMA (Аляска), D. Milling (CANOPUS (CARISMA)), С. Хомутова (обсерватория Новосибирск), О. Kusonsky (обсерватории Arti).

Работа в ИСЗФ была поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (РФФИ) в рамках грантов РФФИ № 08-05-90207 Монг и № 09-02-00082а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Караваев Ю.А., Мишин В.М., Мишин В.В., Шаповалова А.А. Три режима развития малой суббури 20 ноября 2003 года // Солнечно-земная физика. Вып 19. Иркутск, 2011. С. 62–71.
- Gonzalez W.D., Mozer F.S. A quantitative model for the potential resulting from reconnection with an arbitrary interplanetary magnetic field // J. Geophys. Res. 1974. V. 79. P. 4186–4194.
- Iijima T., Fujii R., Potemra T.A., Saflekos N.A. Field-aligned currents in the south cusp and their relationship to the interplanetary magnetic field // Ibid. 1978. V. 83, N 12. P. 5595–5603.
- Lopez R.E., Lyon J.G., Mitchell E., et al. Why doesn't the ring current injection rate saturate? // Ibid. 2009. V. 114, N A02204. doi:10.1029/2008JA013141.
- Milan S.E., Lester M., Cowley S.W.H., et al. Variations in the polar cap area during two substorm cycles // Ann. Geophys. 2003. V. 21. P. 1121–1140.
- Milan S.E., Provan G., Hubert B. Magnetic flux transport in the Dungey cycle: A survey of dayside and nightside reconnection rate // J. Geophys. Res. 2007. V. 112, N A01209. doi:10.1029/2006JA011642.
- Mishin V.M. The magnetogram inversion technique and some application // Space. Sci. Rev. 1990. V. 53. P. 83–163.
- Mishin V.M., Förster M., Kurikalova M.A., Mishin V.V. The generator system of field-aligned currents during the April 06, 2000, superstorm // Available online 31 May 2011.
- Newell P.T., Xu D., Meng C.-I., Kivelson M.G. Dynamical polar cap: a unifying approach // J. Geophys. Res. 1997. V. 102. P. 127–139.
- Newell P.T., Liu K., Sotirelis T., Meng Ch.-I. Polar Ultraviolet Imager observations of global auroral power as a function of polar cap size and tail stretching // Ibid. 2001. V. 106. P. 5895–5905.
- Ostgaard N., Germany G., Stadsnes J., Vondrak R.R. Energy analysis of substorms based on remote sensing techniques, solar wind measurements and geomagnetic indices // Ibid. 2002. V. 107, N A9. doi:10.1029/2001JA002002.
- Papitashvili V.O., Christiansen F., Neubert T. A new model of field-aligned currents derived from high-precision satellite magnetic field data // Geophys. Res. Lett. 2002. V. 29, N 14. doi:10.1029/2001GL014207.
- Petrinec S.M., Russell C.T. Near-Earth magnetotail shape and size as determined from the magnetopause flaring angle // J. Geophys. Res. 1996. V. 101. P. 137–152.
- Potemra T.A. Sources of large-scale Birkeland currents // Physical Signatures of Magnetospheric Boundary Layer Processes. 1994. P. 3–27.
- Shukhtina M.A., Dmitrieva N.P., Sergeev V.A. Quantitative magnetotail characteristics of different magnetospheric states // Ann. Geophys. 2004. V. 22. P. 1019–1032.
- Shukhtina M.A., Dmitrieva N.P., Popova N.G., et al. Observational evidence of the loading-unloading substorm scheme // Geophys. Res. Lett. 2005. V. 32. P. L17107. doi:10.1029/2005GL023779.
- Stern D.P., Alekseev I.I. Where do go in the quiet magnetosphere // Rev. Geophys. 1988. V. 26. P. 782–791.
- Troshichev O.A., Nishida A. Pattern of electron and ion precipitation in northern and southern polar region for northern IMF // J. Geophys. Res. 1992. V. 83. P. 8337.
- Weimer D.R. Maps of ionospheric field-aligned currents as a function of the interplanetary magnetic field derived from Dynamics Explorer 2 data // Ibid. 2001. V. 106. P. 12 889–12 902.

Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск