УДК 550.385 DOI: 10.62955/0135-3748-2024-154

ДИНАМИКА ПРОДОЛЬНЫХ ТОКОВ ЗОНЫ 1 ИИДЖИМЫ-ПОТЕРМЫ В ПЕРИОД СТАЦИОНАРНОЙ МАГНИТОСФЕРНОЙ КОНВЕКЦИИ ПО ДАННЫМ ТЕХНИКИ ИНВЕРСИИ МАГНИТОГРАММ

В.Э. Капустин, С.Б. Лунюшкин, Ю.А. Караваев, Ю.В. Пенских, В.В. Мишин

Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия,
kapustin@iszf.irk.ru

DYNAMICS OF FIELD-ALIGNED CURRENTS IN REGION 1 OF IIJIMA-POTERMA DURING THE PERIOD OF STATIONARY MAGNETOSPHERIC CONVECTION ACCORDING TO THE MAGNETOGRAM INVERSION TECHNIQUE

V.E. Kapustin, S.B. Lunyushkin, Yu.A. Karavaev, Yu.V. Penskikh, V.V. Mishin

Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia,
kapustin@iszf.irk.ru

Аннотация. Представлено исследование интенсивностей крупномасштабных пространственных распределений дневных и ночных продольных токов (ПТ), полученных на основе техники инверсии магнитограмм (ТИМ) в период стационарной магнитосферной конвекции (SMC) 24 сентября 1998 г. Количественно–качественный анализ показал, что в ходе SMC наблюдалось монотонное усиление и квазиравенство между дневными и ночными интенсивностями ПТ зоны 1, при этом рост интенсивности дневных ПТ начался во время слабой суббури, случившейся перед началом SMC, а перед окончанием SMC наблюдался общий спад интенсивностей ПТ зоны 1.

Ключевые слова: стационарная магнитосферная конвекция, продольные токи зоны 1.

Abstract. A study of intensities of large-scale spatial distributions of dayside and nightside field-aligned currents (FAC), obtained using the magnetogram inversion technique (MIT) from ground-based magnetometers, during the period of stationary magnetospheric convection (SMC) on September 24, 1998 is presented. Quantitative and qualitative analysis showed that during the SMC period there was a monotonic increase and quasi-equilibrium between dayside and nightside FACs intensities of region 1, while the increase in the intensity of dayside FAC began before the SMC, during the substorm; before the end of SMC, a decrease in FAC intensities was observed.

Keywords: stationary magnetospheric convection, field-aligned currents region 1.

ВВЕДЕНИЕ

Для объяснения различных типов геомагнитных возмущений (суббурь, бурь и т.д.), которые возникают при взаимодействии солнечного ветра с магнитосферой, Дж. Данжи [Dungey, 1961] предложил общую концепцию механизма пересоединения между межпланетным (ММП) и геомагнитным полем. Одним из таких типов является стационарная магнитосферная конвекция (SMC), предложенная Sergeev et al. [1996]. С ростом пересоединения на дневной магнитопаузе антисолнечная конвекция создает накопление открытого магнитного потока в долях хвоста, что в ионосфере проявляется как расширение полярной шапки (ПШ). Затем пересоединение открытых силовых линий в дальнем хвосте магнитосферы вызывает обратную магнитосферную конвекцию. Предполагается, что во время SMC скорости дневного и ночного пересоединения равны между собой. SMC наблюдается, как правило, в течение 3–6 ч при устойчивой южной компоненте ММП, без характерных для взрывной фазы суббури резких изменений продольных токов (ПТ) при слабо меняющихся индексах AU (~150 nT) и AL (~ 200 nT) (dAL/dt<250 nT/min); SMC может начинаться и заканчиваться суббурей [Sergeev et al., 1996; DeJong et al., 2009].

Считается, что крупномасштабные ПТ отражают интенсивность и конфигурацию магнитосферной конвекции, которая управляется параметрами солнечного ветра и ММП. При исследовании динамики крупномасштабных ПТ по данным AMPERE, Anderson et al. [2014] пришли к результату, что в подготовительной фазе суббури дневные ПТ создаются пересоединением на дневной магнитопаузе, а остальные части системы ПТ формируются по мере того, как конвекционные потоки движутся обратно к Солнцу. Сильная взаимосвязь между ПТ зоны 1 и дневным пересоединением была также отмечена в работе [Coxon et al., 2014]. Однако до сих пор остается неясной взаимосвязь дневных и ночных ПТ зоны 1 в период SMC и их роль в системе ионосфера–магнитосфера. В связи с этим данная работа посвящена изучению динамики крупномасштабных ПТ зоны 1 во время события SMC 24.09.1998.

ДАННЫЕ И МЕТОДЫ

Геомагнитная обстановка 24.09.1998 г. в период 14:00–00:00 UT представлена на рис. 1, где наблюдались две суббури и SMC. Первая слабая суббуря наблюдалась с 14:00 по 16:30 UT (начало взрывной фазы 15:13 UT) и затем перешла в режим SMC (16:30–20:25 UT), который закончился сильной суббурей в 20:25–23:30 UT (начало взрывной фазы 20:25 UT).

Во время SMC наблюдалась преимущественно южная компонента ММП (Bz< 0, рис. 1а), при этом скорость солнечного ветра была повышенной и постоянной v= 440 км/с (рис. 1б). В геомагнитных индексах SMU, SML и SME (рис. 1 в, г) при их высоком уровне в ходе SMC признаков суббури не наблюдалось.

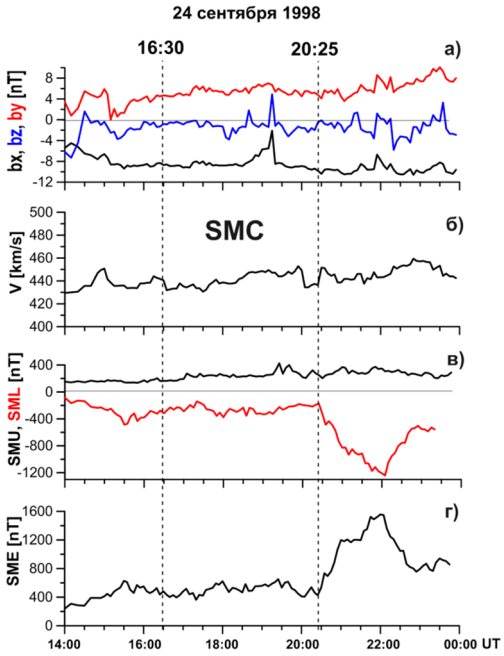

Рис. 1. Графики изменения компонент ММП (а), скорости солнечного ветра (б), авроральных индексов SML, SMU (в) и SME (г) для 14:00–24:00 UT 24.09.1998; пунктирными линиями отмечены границы режима SMC

Для исследования SMC использовался наземный метод ТИМ (техника инверсии магнитограмм) [Базаржапов et al., 1979], а также основанный на нём метод диагностики границ АО [Пенских et al., 2021]. ТИМ обеспечивает расчет карт двумерных распределений эквивалентных токов, электрического потенциала, горизонтальных и ПТ и других электродинамических параметров высокоширотной ионосферы на основе 1-минутных данных непрерывных геомагнитных измерений на мировой сети наземных станций. Одним из ключевых выходных параметров ТИМ является интенсивность втекающих и вытекающих крупномасштабных ПТ зоны 1 Иидджимы-Потермы. Разделив меридианом «утро–вечер» (06–18MLT) карты крупномасштабных ПТ, в период 14:00–00:00 UT (с шагом 5 минут) были получены значения интенсивностей дневных и ночных ПТ зоны 1, как полусумма интенсивностей втекающих–вытекающих системы ПТ зоны 1 на дневной и ночной стороне для северного полушария (рис. 2).

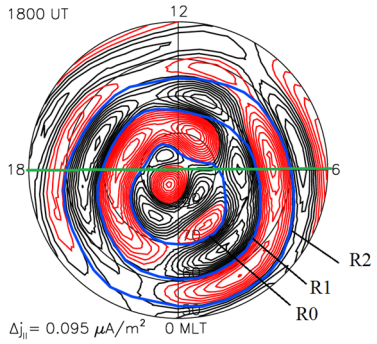

Рис. 2. Распределение плотности ПТ для 18:00 UT 24.09.1998 по данным ТИМ; красные изолинии — вытекающий ПТ, черные — втекающий ПТ, синие линии — границы зон ПТ, зеленая линия — меридиан «утро–вечер»

РЕЗУЛЬТАТЫ

Одной из причин возникновения SMC 24.09.1998 г. стало, по-видимому, развитие небольшой суббури в 14:00–16:30 UT. В этот период наблюдался явный дисбаланс между дневными и ночными интенсивностями ПТ зоны 1 (рис. 3а, б). Резкое усиление ночного ПТ происходит вследствие развития суббуревого токового клина, как процесса пересоединения замкнутых магнитных силовых линий в околоземной части (10–15 R_E) плазменного слоя [Mishin et al., 2017]. Одновременно с усилением интенсивности ночных ПТ монотонно усиливались и дневные ПТ, которые были непосредственно связаны с крупномасштабной динамикой ПТ. После 16:00 UT интенсивность ночных ПТ уменьшалась, но при этом интенсивность дневных ПТ продолжала усиливаться.

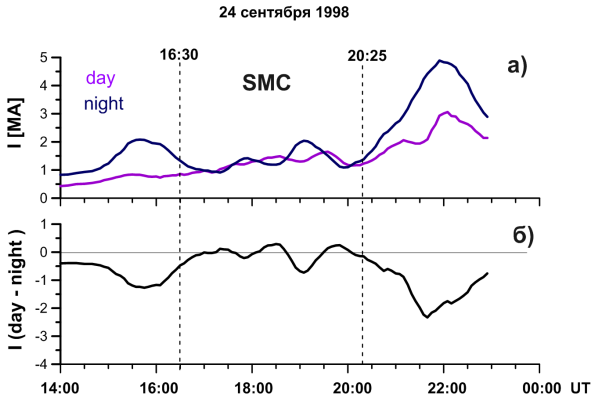

Рис. 3. Графики изменения интенсивностей дневных (day) и ночных (night) ПТ зоны 1 (а), разница между дневными и ночными интенсивностями ПТ зоны 1 (б)

После окончания суббури в период 16:30–20:25 UT устанавливается SMC, где наблюдалось монотонное усиление (рис. 3а) и квазиравенство между дневными и ночными интенсивностями ПТ (рис. 3б). Мы предполагаем, во-первых, что в этот период источником дневных ПТ является генератор ЭДС, работающий на нормальной к магнитопаузе компоненте магнитного поля Bn в открытой плазменной мантии магнитосферного хвоста. Во-вторых, источником ночных ПТ является генератор ЭДС, который сформировался в среднем хвосте магнитосферы (35–50 R_E) в результате перемещения околоземной X-линии. Также мы предполагаем, что в период SMC непрерывно действуют два генератора, которые обеспечивают монотонный рост и равенство между дневными и ночными интенсивностями ПТ, при этом дневные ПТ усиливались еще до SMC.

Спустя некоторое время усиление ПТ прекратилось и в 20:00 UT начался спад интенсивностей ПТ. Скорее всего такая реакция ПТ, связана с инверсией знака южной компоненты ММП, которая возникла в период 19:20–19:45 UT (рис. 1а). Как правило, уменьшение скорости пересоединения на дневной стороне магнитосферы или поворот южной компоненты ММП к северу должны приводить к окончанию SMC в виде развития суббури или затухания

геомагнитной активности [Sergeev et al., 1996]. Действительно, в нашем случае после уменьшения интенсивностей ПТ снова наблюдается их резкий рост, который соответствует началу взрывной фазы сильной суббури (20:25 UT) после режима SMC.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам данного исследования можно предположить, что процессы дневного и ночного пересоединений влияют соответственно на дневные и ночные интенсивности ПТ зоны 1 во время SMC. Увеличение общей интенсивности ПТ в этот период может также свидетельствовать об усилении магнитосферной конвекции. Наши результаты согласуются с работой Kissinger et al. [2012], в которой авторы предположили, что выполнения условия баланса скоростей дневного и ночного пересоединений недостаточно для подержания SMC. Для этого необходимо еще и формирование во внутренней магнитосфере высокоскоростных конвекционных потоков плазмы, которые должны быстро возвращаться на дневную сторону и при этом усиливать общую интенсивность ПТ зоны 1.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Базаржапов А.Д., Матвеев М.И., Мишин В.М. Геомагнитные вариации и бури. Новосибирск, Наука, 1979, 248 с.

Пенских Ю.В., Лунюшкин С.Б., Капустин В.Э. Геомагнитный метод автоматической диагностики границ авроральных овалов в двух полушариях Земли // Солнечно-земная физика. 2021. Т. 7, №. 2. С. 63–76. DOI: 10.12737/szf-72202106.

Anderson B.J., Korth H., Waters C.L. et al. Development of large-scale Birkeland currents determined from the Active Magnetosphere and Planetary Electrodynamics Response Experiment // Geophys. Res. Lett. 2014. V. 41, N 9. P. 3017–3025. DOI: 10.1002/2014gl059941.

Coxon J.C., Milan S.E., Clausen L.B.N. et al. A superposed epoch analysis of the regions 1 and 2 Birkeland currents observed by AMPERE during substorms // J. Geophys. Res.: Space Phys. 2014. V. 119, N 12. P. 9834–9846. DOI: 10.1002/2014ja020500.

DeJong A.D., Ridley A.J., Cai X., Clauer C.R. A statistical study of BRIs (SMCs), isolated substorms, and individual sawtooth injections // J. Geophys. Res.: Space Phys. 2009, V. 114, N A8. P. A08215. DOI: 10.1029/2008ja013870.

Dungey J.W. Interplanetary Magnetic Field and the Auroral Zones // Phys. Rev. Lett. 1961. V. 6, N 2. P. 47–48. DOI: 10.1103/PhysRevLett.6.47.

Kissinger J., McPherron R.L., Hsu T.S., Angelopoulos V. Diversion of plasma due to high pressure in the inner magnetosphere during steady magnetospheric convection // J. Geophys. Res.: Space Phys. 2012. V. 117, N A5. P. A05206. DOI: 10.1029/2012ja017579.

Mishin V.M., Mishin V.V., Lunyushkin S.B. et al. 27 August 2001 substorm: Preonset phenomena, two main onsets, field-aligned current systems, and plasma flow channels in the ionosphere and in the magnetosphere // J. Geophys. Res.: Space Phys. 2017. V. 122, N 5. P. 4988–5007. DOI: 10.1002/2017ja023915.

Sergeev V.A., Pellinen R.J., Pulkkinen T.I. Steady magnetospheric convection: A review of recent results // Space Sci. Rev. 1996. V. 75, N 3. P. 551–604. DOI: 10.1007/bf00833344.