

УДК 550.385.36

О ВНЕШНИХ ИСТОЧНИКАХ ИЗМЕНЕНИЙ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА СТ. АКАДЕМИК ВЕРНАДСКИЙ ВО ВРЕМЯ МАГНИТНОЙ БУРИ 6–7 АПРЕЛЯ 2000 Г.

О.И. Максименко, В.Г. Бахмутов, Г.В. Мельник, О.Я. Шендеровская

*Институт геофизики им. С.И. Субботина НАНУ, пр-т Палладина, 32, Киев, Украина
gmelnyk@igph.kiev.ua*

Реферат. Рассматриваются относительные изменения магнитных полей основных токовых источников (кольцевого тока КТ, состоящего из симметричного SRC и частичного асимметричного PRC токов, поперечного тока хвоста магнитосферы, продольных токов Биркеланда), входящих в полное поле магнитосферных возмущений, вдоль магнитных силовых линий на меридиане обсерватории Академик Вернадский во время главной фазы магнитной бури 6–7 апреля 2000 г. Используются расчеты геометрии магнитных силовых линий и магнитного поля возмущений по модели Цыганенко T01 для изучения распределения магнитных полей во внутренней магнитосфере.

**Про зовнішні джерела змін магнітного поля на ст. Академік Вернадський під час магнітної бурі
6–7 квітня 2000 р.** О.І. Максименко, В.Г. Бахмутов, Г.В. Мельник, О.Я. Шендеровська

Реферат. Розглядаються відносні зміни магнітних полів основних струмових джерел (кільцевого струму КС, що складається з симетричного SRC і часткового асиметричного PRC струмів, поперечного струму хвоста магнітосфери, поздовжніх струмів Біркеланда), що входять у повне поле магнітосферних збурень, уздовж магнітних силових ліній на меридіані обсерваторії Академік Вернадський під час головної фази магнітної бурі 6–7 квітня 2000 р. Використано обчислення геометрії магнітних силових ліній та магнітного поля збурень за моделлю Циганенка T01 для вивчення розподілу магнітних полів у внутрішній магнітосфері.

**About external sources of the magnetic field variations on Academic Vernadsky observatory during a
magnetic storm on April, 6-7th 2000.** O.I. Maksimenko, V.G. Bakhmutov, G.V., Melnyk,
O.Ya. Shenderovskaya

Abstract. Changes of modelling magnetic fields of the basic current sources (the ring current RC, including symmetric SRC and asymmetric partial RC PRC, a cross-section current of a magnetospheric tail, the Birkeland's longitudinal currents), composing a magnetospheric total field disturbances, along the magnetic field lines on a meridian of an Academic Vernadsky observatory for the main phase of a magnetic storm on April, 6-7th 2000 are considered. The calculations of the geometry of the magnetic field lines and a magnetic field of the magnetospheric disturbances by Tsyganenko's model T01 for the investigation of the distributions of the magnetic fields in the internal magnetosphere have been used.

Key words: magnetic storm, current sources, Tsyganenko model T01.

1. Введение

Особенность исследования геомагнитных вариаций определяется динамикой расположения обсерватории Академик Вернадский относительно высокоширотных геофизических структур (авроральных электроструй и овала полярных сияний, каспа и полярной шапки), связанных с неоднородными плазменными областями и токами во внутренней магнитосфере (плазменный слой, кольцевой ток, плазмопауза и т.д.)

Известно, что магнитная буря – это реакция на образование токовых систем во внутренней магнитосфере под влиянием возмущенного потока солнечного ветра СВ после продолжительного южного направления вертикальной компоненты ММП. В общем случае она характеризуется тремя фазами: начальной, главной и самой продолжительной фазой восстановления. После увеличения энергии и появления поперечных токов в хвосте магнитосферы, в том числе во время суббурь, при сжатии магнитосферы быстрым потоком солнечной плазмы формируется кольцевой ток КТ в главную фазу, а в фазу восстановления постепенно ослабевает КТ и исчезает ток хвоста после смены знака вертикальной компоненты ММП. Основным токовым источником вариации по времени бури *Dst* является кольцевой ток западного направления порядка 10^6 А. Продольные токи из плазменного слоя магнитосферы замыкаются вблизи границы полярной шапки (области 1) и вдоль авроральных широт (область 2). Их величина и направление изменяются на обратные при смене знака B_z компоненты ММП и при переходе от утреннего к вечернему сектору.

Существует различная широтная динамика положения и ширины восточной и западной авроральных электроструй в ионосфере, которые отличаются по величине и по направлению (преимущественно к экватору) в зависимости от глобальной магнитной активности (K_p индекс) и интенсивности бури (*Dst* индекс), что и отражается в геомагнитных вариациях поля (Feldshtein et al., 2006). Станция AIA находится в области локальных изменений магнитного поля на самой южной географической параллели, где наблюдается экваториальная граница аврорального овала при очень сильных магнитных бурях ($K_p=8$).

По наиболее близким к выбранному времени данным спутника DMSP (17:12UT при эквивалентном $K_p=3.7$) минимальная наблюдаемая экваториальная (полярная) граница овала отмечена в районе с географическими координатами $\varphi=-43^\circ$ и $\lambda=118^\circ$ ($\varphi=-54.9^\circ$ и $\lambda=119.49^\circ$) и магнитными координатами $\Phi=-58.68^\circ$ и $\Lambda=188.34^\circ$ ($\Phi=-69.75^\circ$ и $\Lambda=173.34^\circ$) в ночном секторе OMLT. Выбранная большая магнитная буря характеризуется магнитным индексом $K_p=8$ и в максимуме развития в 01UT 7 апреля индексом *Dst* = -288нТл.

В данной работе рассматриваются относительные изменения магнитных полей основных токовых источников, создающих полное поле магнитосферных возмущений вдоль магнитных силовых линий (МСЛ) на меридиане обсерватории AIA в течение магнитной бури 6–7 апреля 2000 г. Используется метод сопряженности по магнитным силовым линиям в соединении с моделью расчета магнитного поля T01 для изучения асимметрии (утро-вечерней, полуденно-полуночной и вдоль промежуточных временных сечений меридианов) распределения магнитного поля возмущений в магнитосфере. МСЛ, которые проектируются в одну и ту же структуру магнитосферы, были рассчитаны по эмпирической модели магнитного поля с учетом магнитосферных возмущений, которая была создана Цыганенко в 2002 году (Tsyganenko, 2002).

2. Результаты

Нами были проведены исследования на примере модельных расчетов для большой магнитной бури 6–7 апреля 2000 г. в 19:10UT через 2,5 часа после внезапного начала бури в её главную фазу при *Dst* = -125нТл. Входные параметры для модельных расчетов следующие: значения компонент ММП $B_y=-18.7$ нТл, $B_z=-17$ нТл, давление СВ $P_{dyn}=8.7$ нПа, скорость СВ $V=530$ км/с, угол наклона геодиполя 15° . Особенностью этой бури является внезапное начало, очень короткая начальная фаза и резкий поворот к северу вертикальной компоненты ММП во время пика *Dst*.

На рис. 1 показаны изменения поля во время магнитной бури 6–7 апреля 2000 г., зарегистрированные на различных обсерваториях, находящихся в одном меридиональном секторе ($\lambda=280 - 300^\circ$) на разных широтах. Поле магнитной бури рассчитывалось как разница значений H -компоненты во время бури и спокойного уровня, определенного как

среднее значение в последний спокойный день перед бурей и первый спокойный после бури, что, по сути, представляет собой вариацию D_{st} . Обсерватория FRD расположена наиболее близко к сопряженной с AIA по геомагнитным координатам и суббурям области (Яременко и др., 2004). Как видно на рисунке, вариации в AIA и FRD имеют похожий характер. Некоторые различия могут быть обусловлены локальными особенностями или удалённостью от аврорального овала. На обсерватории IQA, имеющей наиболее близкие к AIA географические координаты в северном полушарии, наблюдаются совсем другие вариации, характерные для высокоширотных обсерваторий. Поэтому при дальнейшем рассмотрении вариаций во время этой бури на Земле будем использовать геомагнитные координаты

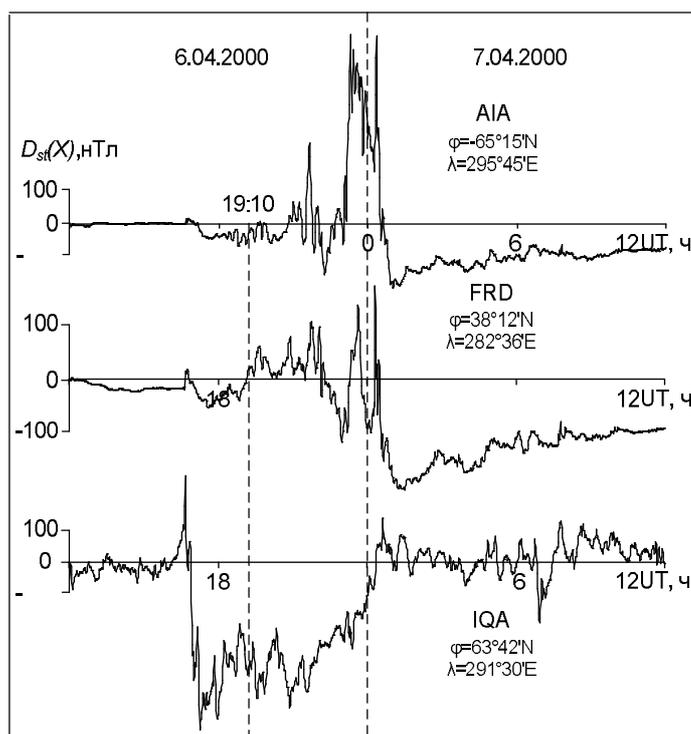


Рис. 1. Изменения геомагнитного поля во время бури 6–7 апреля 2000 г. на обсерватории AIA, на обсерватории FRD, наиболее близко расположенной к её сопряженной по геомагнитным координатам области, и обсерватории IQA, имеющей наиболее близкие к AIA географические координаты в северном полушарии.

Для условий рассматриваемой магнитной бури по результатам расчетов сопряженные точки AIA на разных концах силовых линий были сдвинуты в северном полушарии на 4.12° и 3.84° к экватору по широте и на 3.52° и 3.13° по долготе к востоку при $Dst=-125$ и при $Dst=-300$ нТл соответственно. Таким образом, сопряженные точки обсерватории AIA имели географические координаты $\varphi=40.36^\circ$ и $\lambda=290.04^\circ$, геомагнитные координаты $\Phi=50.81^\circ$ и $\Lambda=1.81^\circ$ при $Dst=-125$ нТл и координаты $\varphi=40.6^\circ$ и $\lambda=290.36^\circ$, $\Phi=51.04^\circ$ и $\Lambda=2.2^\circ$ для $Dst=-300$ нТл.

В связи с поставленной задачей поиска источников магнитных вариаций, наблюдаемых на AIA, определим величины магнитного поля в этой области и вдоль траектории магнитных силовых линий, которые отражают непосредственное состояние плазмы и поля определенной области в магнитосфере.

Полное магнитное поле в максимальной точке магнитной силовой линии AIA с максимальным погружением в магнитосферу на $X_{GSM}=2.84R_E$ достигло для компоненты $Z_{GSM} B_z G_0 = -57.9$ нТл. При этом относительные вклады каждого источника полей G4 с SRC и PRC, G3 составили последовательно 0.96, 0.32, 0.132 и 0.13, т.е. с преимущественным влиянием поля кольцевого тока на расстоянии по оси $X_{GSM}=2.73R_E$ в послеполуночном секторе (15LT). Изменения величины модельных полей в магнитосфере при ее зондировании магнитными силовыми линиями, смещёнными вдоль меридиана AIA с увеличением широты и, следовательно, с увеличением погружения внутрь магнитосферы, приведены на рис. 2 вдоль траектории магнитной силовой линии для ряда пунктов в южном полушарии через 2° в широтном диапазоне $\varphi = -66^\circ \div -76^\circ$ вдоль меридиана 296° и соответствующих координат X_{GSM} для каждой из наборов силовой линии. Графики этих МСЛ в двух плоскостях XU и XZ системы GSM показаны на рис. 3, где видны только замкнутые линии. Согласно проведенным расчетам, силовые линии раскрываются после $\varphi = -87^\circ$.

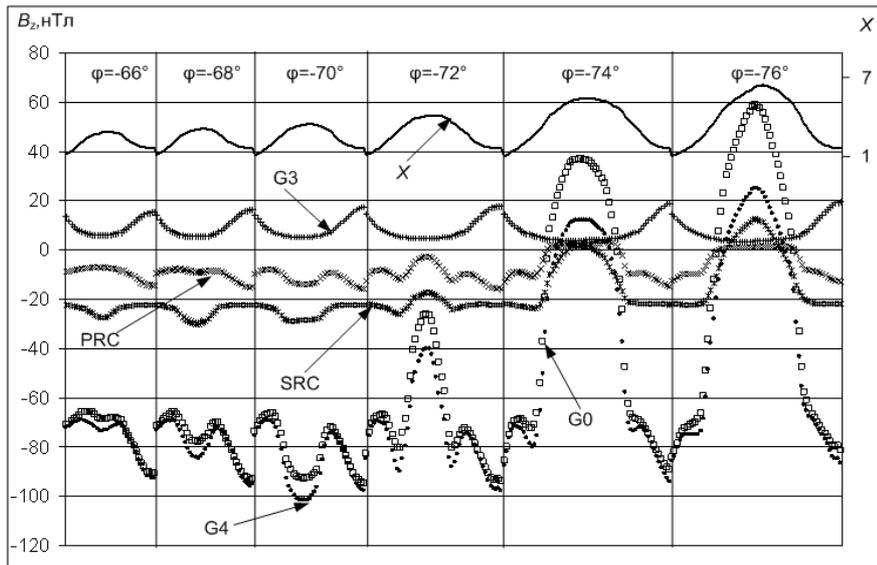


Рис. 2. Изменения величины модельных полей в магнитосфере вдоль траектории магнитной силовой линии для ряда пунктов в южном полушарии через 2° в широтном диапазоне $\varphi = -66^\circ \div -76^\circ$ вдоль меридиана 296° .

Рассматривались изменения формы МСЛ и соответствующих величин поля в зависимости от интенсивности возмущения в магнитоспокойных условиях 11 апреля 2000 г. ($Dst=0$ нТл и $Dst=-34$ нТл) в 19:10UT и во время гипотетических возмущений ($Dst=-300$ нТл) для временных секторов 12UT и 00UT на том же меридиане в расширенном широтном интервале ($\varphi = -66^\circ \div -80^\circ$). Обнаружено углубление внутрь магнитосферы, а именно увеличение максимального расстояния X_{GSM} с ростом широты, и появление разомкнутости МСЛ с меньших широт при сильных возмущениях.

Согласно проведенным расчетам МСЛ вдоль меридиана 296° с шагом 2° по широте, максимум замкнутой силовой линии AIA при $Dst=-125$ нТл находится на $2.84R_E$, а в спокойных условиях – на $2.51R_E$.

Особо обратим внимание, что при северном направлении ММП в восстановительную фазу бури МСЛ зондировали магнитосферу глубже на широте AIA до $3.38R_E$ в 11LT по сравнению с $2.84R_E$ при южной B_z ММП в 15LT и что отмечены более интенсивные отрицательные магнитные поля в области КТ.

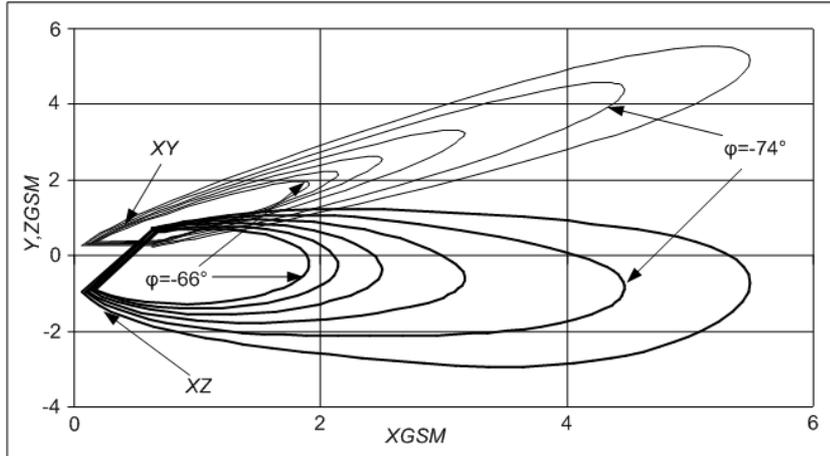


Рис. 3. Графики магнитных силовых линий в двух плоскостях XU и XZ системы GSM в широтном диапазоне $\varphi = -66^\circ \text{--} -76^\circ$ вдоль меридиана 296° .

Проведён анализ изменений формы МСЛ для тех же условий возмущённости ($Dst = -125$ нТл) вдоль $\Phi = 60^\circ$ в северном полушарии в восьми временных секторах. Были обнаружены области с наиболее глубоким $-45R_E$ и $-12R_E$ погружением в ночную магнитосферу в 23LT и 21LT соответственно. Наблюдались также вытянутость в меридиональном направлении утром в 3LT и 7LT до $-10R_E$ и $-7R_E$ и области, в которых МСЛ связана с поясом КТ ($5.92R_E$) в секторах 11LT и 15 – 16LT ($4R_E$ и $3.4R_E$ соответственно). По-видимому, можно ожидать подобную картину временных изменений геометрии и магнитного поля и на широте AIA, имеющей более низкую магнитную широту $\Phi = -54^\circ$, но только при больших возмущениях с $Dst < -300$ нТл, т.е. в максимуме бури. При этом следует учитывать северо-южную асимметрию, особенно при больших наклонах диполя, и эффект смещения точки погружения (максимум МСЛ). Например, если на широте AIA МСЛ в вечернем секторе вытягивается на $0.21R_E$, оставаясь в области КТ ($>3R_E$), то на высоких широтах ($\Phi = -77^\circ S$) они вытягиваются на $3.6R_E$ от $-11.6R_E$ до $-15.1R_E$, погружаясь уже в область хвоста магнитосферы и плазменного слоя при уменьшении Dst от -125 нТл до -300 нТл. Таким образом, с широтой изменяется область погружения силовых линий в магнитосферу, что позволяет изучать разные локальные области магнитосферы с соответствующим распределением магнитных полей посредством МСЛ.

Как видно на рис. 2, величина и направление магнитных полей в магнитосфере изменяются в областях максимального погружения МСЛ, которые смещаются вглубь с ростом широты от $\varphi = -66^\circ$ до $\varphi = -76^\circ$. Величина модельного полного магнитного поля (по модулю) увеличивается от $G0 = -74$ нТл до $G0 = -92$ нТл на земной поверхности, тогда как в максимуме МСЛ заметно усиливается отрицательное полное магнитное поле от $G0 = -67$ нТл на $X = 2.9R_E$ до $G0 = -91.7$ нТл. Одновременно усиливается и поле КТ от $G4 = -74$ нТл до $G4 = -101.6$ нТл на $X = 3.49R_E$. С изменением направления поля на $\varphi = -74^\circ$ отмечается последующее усиление его напряжённости до $+60$ нТл ($X = 6.47R_E$) на $\varphi = -76^\circ$. Наблюдаемый максимум отрицательных значений полного поля и превалирующего поля КТ на расстоянии $X = 3.49R_E$ при зондировании МСЛ с $\varphi = -70^\circ$, по-видимому, отражает погружение в область больших отрицательных полей КТ в послеполуденном секторе магнитосферы (15LT). Они сопровождаются вкладом поля симметричного КТ 30% и частичного КТ 19% и дополнительно положительных полей как суммы четырех токов Биркеланда, что вместе с полем токов хвоста магнитосферы и токов на поверхности магнитопаузы определяет уменьшение полного поля.

Широтные изменения вдоль меридиана AIA (местное время 15:10LT) полного модельного поля G0 и составляющих его полей токов хвоста G2, Биркеланда G3, кольцевого тока G4 и его симметричной SRC и асимметричной PRC частей показаны на рис. 4. Обращает на себя внимание тот факт, что вклад кольцевого тока в полное поле является преобладающим в диапазоне широт от 55 до -65° . В точках с $\Phi=55^\circ 20'$ и $\Phi=-64^\circ 42'$ наблюдаются экстремальные значения полей G0 и G4, а также асимметричной части G4 PRC. Далее к высоким широтам увеличивается вклад поля биркеландовских токов G3, который и определяет ход поля G0 здесь. К высоким широтам относительный вклад G3 в полное поле возрастает для обоих полушарий.

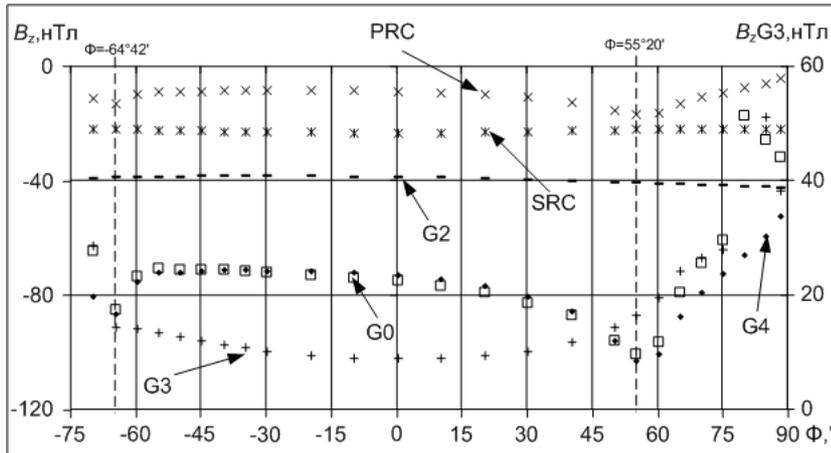


Рис. 4. Широтные изменения вдоль меридиана AIA (местное время 15:10LT) полного модельного поля G0 и составляющих его полей токов хвоста G2, Биркеланда G3, кольцевого тока G4 с его симметричной SRC и асимметричной PRC частями.

Несколько возрастает также вклад PRC в G4, при этом вклад SRC уменьшается. Относительный вклад поля токов хвоста G2 максимален на экваторе, к высоким широтам он уменьшается.

В других долготных секторах наблюдаются свои особенности широтного хода, связанные, по-видимому, с местным временем. Так, для меридиана $\lambda=60^\circ$ (23:10LT) минимум полного поля G0 наблюдается на широте $\Phi=-74^\circ$, в то время как в северном полушарии наблюдается лишь некоторое плавное увеличение поля после $\Phi=60^\circ$. Два минимума полного поля для сектора с $\lambda=0^\circ$ (19:10LT) наблюдаются на широтах $\Phi=-60^\circ$ и $\Phi=65^\circ$. Минимум полного поля для сектора $\lambda=240^\circ$ (11:10LT) наблюдается на широте $\Phi=-75^\circ$, в северном же полушарии экстремальное положительное значение G0 соответствует $\Phi=56^\circ$, после чего происходит некоторое уменьшение его величины с резкими положительными всплесками. В диапазоне широт $\Phi=\pm 60^\circ$ величины полного поля G0 и поля кольцевого тока G4 практически совпадают для долгот $\lambda=300^\circ$ и $\lambda=240^\circ$, как и для меридиана AIA. Для секторов с $\lambda=0^\circ$ и $\lambda=60^\circ$ поле кольцевого тока по своей абсолютной величине меньше, чем полное поле. Таким образом, можно говорить о том, что в дневное время вклад поля кольцевого тока в общее поле магнитосферных возмущений является преобладающим в диапазоне широт $\Phi=\pm 60^\circ$. В ночном секторе возрастает вклад других токовых источников, в частности, поля токов хвоста магнитосферы (Kalegaev et al., 2005).

Для объяснения причин полученных широтных вариаций следует, по-видимому, использовать карты отождествления плазменных структур и токов внутри магнитосферы с наземным положением областей высыпания энергичных частиц и их границ, аврорального овала, электроджетов (Feldstein et al., 2005), каспа и других структур, полученных в

результате обработки спутниковых данных (Newell et al., 2004) для периода максимума солнечного цикла. При этом желательно одновременно рассмотреть широтные и долготные вариации для определенных заданных параметров ММП и СВ, что предстоит выполнить в дальнейшем.

3. Выводы

С помощью МСЛ было обнаружено усиление отрицательного магнитного поля с максимумом -101.6 нТл на расстоянии $X=3.49R_E$ в верхней точке МСЛ на $\varphi=70^\circ$, что, по-видимому, вызвано её попаданием в область магнитного поля КТ в послеполуночном секторе магнитосферы. Показано, что такой подход применим для изучения топологии магнитного поля магнитосферных возмущений, что необходимо для улучшения кинетической модели КТ.

Определены смещение положения сопряжённых точек АИА с ростом Dst от -125 нТл до -300 нТл на 3.84° к экватору по широте и на 3.13° к востоку по долготе, а также значительное увеличение смещения на высоких широтах в послеполуночном секторе 15 LT. Сопряженные точки АИА имели географические координаты $\varphi=40.36^\circ$ и $\lambda=290.04^\circ$, геомагнитные $\Phi=-50.81^\circ$ и $\Lambda=1.81^\circ$ при $Dst=-125$ нТл и $\varphi=40.6^\circ$ и $\lambda=290.36^\circ$, $\Phi=51.04^\circ$ и $\Lambda=2.2^\circ$ при $Dst=-300$ нТл. Они находятся вблизи обсерватории FRD в северном полушарии при возмущении порядка $Dst=-125$ нТл, т.е. в области $\Phi < 60^\circ$.

Выявлено наибольшее погружение в магнитосферу верхней точки МСЛ вдоль широты $\varphi=60^\circ$ в ночном секторе (21 LT) до $X=-12R_E$ и в (23 LT) до $X=-45 R_E$, а также увеличение погружения на $3.6R_E$ от $-11.6R_E$ до $-15.1R_E$ на высокой широте $\varphi=77^\circ$, т.е. в область хвоста магнитосферы и плазменного слоя при увеличении Dst от -125 нТл до -300 нТл.

Используемый метод МСЛ позволил выявить включение источников КТ (максимумы отрицательных магнитных полей на МСЛ), высыпания энергичных частиц (раскрытие МСЛ в каспе.), а также включение нового источника поля авроральных струй разных знаков на широтах более 68° и соответствующих более слабым токам их растекания при суббурях утром и вечером значительно экваториальнее авроральной зоны.

Литература

1. Яременко Л.Н., Мозговая Т.А. Сопряжённость магнитных суббурь в средних широтах северного и южного полушарий // Косм. наука і технологія. – 2004. – 10, N 5-6. – С. 100–106.
2. Feldstein Y.I., Popov V.A., Cumnock J.A., Prigancova A., Blomberg L.G. J Auroral electrojets and boundaries of plasma domains in the magnetosphere during magnetically disturbed intervals // Annales Geophysicae. – 2006. – V.24. – №8. – P. 2243–2276.
3. Newell P.T., Ruohoniemi J.M., Meng C.-I. Maps of precipitation by source region, binned by IMF, with inertial convection streamlines // Journal of Geophysical Research. – 2004. – Vol. 109. – No. A10 – A10206. – 10.1029/2004JA010499.
4. Kalegaev V.V., Ganushkina N.Y., Pulkkinen T.I., Kubyshkina M.V., Singer H.J. and Russell C.T. Relation between the ring current and the tail current during magnetic storms // Annales Geophysicae. – 2005. – V. 23 – №2. – P. 523–533.
5. Tsyganenko N.A. A new magnetospheric magnetic field model. 1. Mathematical structure. 2. Parameterization and fitting to observations // Journal of Geophysical Research. – 2002. – V. 107. – No.A8. – 10.1029/2001JA000220.