

Электрические Поля и Электромагнитные Параметры Геомагнитной Бури при Северном Направлении Межпланетного Магнитного Поля

Кузнецова Т.В., Лаптухов А.И., Петров В.Г.

ИЗМИРАН, Московская обл, Троицк, Россия, tvkuz@izmiran.ru

Проведен анализ аномальной магнитной бури 21-22 января 2005 года, главная фаза которой развивалась при северном направлении межпланетного магнитного поля (ММП). Для объяснения бури мы представляем результаты наших исследований о влиянии взаимной ориентации электрического поля солнечного ветра E и магнитного момента Земли M на геомагнитную активность (ГА). Результаты, полученные на основе измерений скорости солнечного ветра и ММП на ~ 1 а.е. в 1963-2005 гг, показали, что ГА зависит как от величины E , так и от угла между векторами E и M . Как следствие мы получили четкий рост ГА при северном направлении ММП и постоянной величине E и показали, что этот рост вызван компонентой E_m (вектора E вдоль вектора M). Показано, что необычно большие величины $E_m \sim 15.7$ mV/m и скорости поступления электромагнитной энергии солнечного ветра именно в южную полярную шапку $P_m \sim 2.4 \cdot 10^{-4}$ W/m² сыграли важную роль в развитии главной фазы аномальной бури. На основе расчетов компонент вектора Пойтинга P и электрического поля E в солнечном ветре с учетом их ориентации относительно вектора момента M , показано, что изменения Dst-индекса в бурю следуют за изменениями компонент этих векторов. Результат указывает на приблизительное равенство скорости поступления энергии и скорости ее диссипации в магнитосфере. Основываясь на проведенном анализе, мы предлагаем возможный механизм развития главной фазы бури: пересоединение геомагнитного поля с северной и азимутальной компонентами ММП в каспах и полярных областях обоих полушарий, что приводит к интенсивной межполушарной конвекции. Мощность электромагнитных источников, поступающих от солнечного ветра к магнитосфере в аномальную бурю, $\sim 10^{12}$ Ватт.

Введение

Магнитная буря 21-22 января 2005 г. была аномальной, так как главная фаза бури развивалась при ММП северного направления ($B_z > 0$), что не укладывается в рамки современных представлений о механизме развития бури. Авторы [1] при анализе этой бури придерживаются гипотезы, что взаимодействие ММП и магнитосферы осуществляется только при южном направлении ММП ($B_z < 0$). При таком подходе на первом этапе энергия накапливается в хвосте магнитосферы, а после задержки по времени наступает фаза ее диссипации в магнитосфере в виде токов западного направления, которые обеспечивают депрессию Dst-индекса. В этом объяснении нет новых идей, а предложенное объяснение и самим авторам кажется неудовлетворительным: “Мы, конечно, не имеем ответа относительно механизма для аномальной магнитной бури, происходившей при северном направлении магнитного поля. Мы призываем других искать и исследовать такие явления для их более полного понимания”. Мы разделяем мнение авторов о необходимости исследовать эту бурю и призываем других также внести свой вклад. Наш анализ бури еще далек от завершения, но полученные результаты указывают на то, что для объяснения подобных возмущений необходимо изменить саму принятую модель возникновения бури.

Следует сказать, что Du et al [1] использовали не среднечасовой Dst-индекс как мы, а 1-минутный SYMH индекс, который полностью аналогичен Dst (кроме разрешения по времени). Авторы использовали также параметры солнечного ветра с нескольких космических аппаратов. Мы пользовались базой данных (<http://www.omni.web.gsfc.nasa.gov/>), где представлены среднечасовые

значения параметров солнечного ветра. Для целей, стоящих в нашем исследовании (анализ энергетических и других параметров, определяющих процесс пересоединения геомагнитного и межпланетного полей), минутные данные не нужны. Детализация данных будет нужна на следующем этапе, когда в общих чертах ясен механизм бури. Наш анализ показывает, что в целом временные интервалы изменения параметров солнечного ветра, ММП и Dst (SYMH) мало отличаются по времени. Отличие наших результатов и результатов [1] – это использование различных характеристик для описания бури (скорости поступления энергии солнечного ветра и других) и как следствие интерпретации. Авторы методом сравнения поступления энергии солнечного ветра (описываемого суммой электрических полей E_y , определяемых $B_z < 0$) и ее диссипации (описываемой SYMH индексом) предложили объяснение бури.

Вектор Пойтинга и электрическое поле

Мы используем вектор Пойтинга $\mathbf{P} = [\mathbf{E}, \mathbf{V}]$, где выражение в скобках – векторное произведение электрического \mathbf{E} и магнитного \mathbf{V} полей. Известно, что модуль вектора P равен энергии, переносимой за единицу времени через единичную площадку поверхности, перпендикулярную к направлению вектора P . Компонент вектора P вдоль вектора скорости солнечного ветра V :

$$P_v = (\mathbf{P}, \mathbf{V}) / |\mathbf{V}|, \quad (1)$$

где $|\mathbf{V}|$ – модуль скорости V . Компонента P_v не учитывает взаимную ориентацию векторов P и момента M , но позволяет оценивать скорость поступления энергии от солнечного ветра. Две следующие компоненты вводятся с учетом взаимной ориентации векторов P и M :

$$P_m = (\mathbf{P}, \mathbf{M}) / |\mathbf{M}|, \quad (2)$$

где P_m – компонента вектора \mathbf{P} вдоль вектора \mathbf{M} ; модуль вектора $|\mathbf{M}|=1$ здесь и ниже.

$$P_e = (\mathbf{P}, [\mathbf{B} [\mathbf{V}, \mathbf{M}]]) / |\mathbf{B} [\mathbf{V}, \mathbf{M}]| = B^2 E_{mv} |\mathbf{V}| / |\mathbf{B} [\mathbf{V}, \mathbf{M}]| \quad (3)$$

где P_e – компонента вектора \mathbf{P} вдоль единичного вектора $[\mathbf{B} [\mathbf{V}, \mathbf{M}]]$.

$$E_{mv} = (\mathbf{E}, [\mathbf{M}, \mathbf{V}]) / |\mathbf{V}| = V (B_y M_y + B_z M_z) = |\mathbf{E}| M_{yz} \cdot \sin(U_{em}) \quad (4)$$

где E_{mv} – введенная нами компонента вектора \mathbf{E} , перпендикулярная как вектору \mathbf{M} , так и вектору \mathbf{V} ; M_{yz} – модуль вектора \mathbf{M} на плоскости YZ , U_{em} – угол между векторами \mathbf{E} и \mathbf{M} на этой плоскости. Обоснование для введения E_{mv} приведено в наших работах [2] и [3]. Отметим, что знак P_e в (3) определяется знаком E_{mv} .

$$E_m = (\mathbf{E}, \mathbf{M}) = V (M_z B_y - M_y B_z) = |\mathbf{E}| M_{yz} \cdot \cos(U_{em}), \quad (5)$$

где E_m – компонента вектора электрического поля солнечного ветра $\mathbf{E} = [\mathbf{B}, \mathbf{V}]$ вдоль вектора \mathbf{M} ; \mathbf{V} – вектор скорости, направленный вдоль оси x (здесь и ниже используется GSE с.к.), V – величина скорости.

Для расчетов по формулам (1)-(5) использовались измерения компонент ММП и скорости V в солнечном ветре в 1964-2005 гг. в GSE с.к. Для расчетов компонент вектора момента в GSE с.к. (с учетом орбитального и суточного движений Земли) использовалась написанная нами ранее программа. Индекс K_p в базе omni.dat дается в виде, удобном для вычислений: $3+ = 33$, $6- = 57$, $4 = 40$ (вместо обычной шкалы от 0 до 9 с шагом 1/3). Графики статьи представлены в этих единицах.

Результаты исследования влияния описанных выше компонент вектора Пойтинга на ГА приведены на Рис. 1,2. На рисунках для получения значений P в единицах системы СИ ($\text{Ватт}/\text{м}^2$) надо все величины P умножить на $8 \cdot 10^{-7}$, а E на 20 – чтобы получить значения в мВ/м. Зависимость Dst от компоненты P_m , рассчитанной на основе измерений на орбите Земли в 1964-2005 гг по формуле (2), приведены на рис. 1. Рис. 1 показывает, что возмущения с депрессией, большей $Dst \sim -100$ нТ, наблюдаются при $P_m < 0$, т.е. при противоположной ориентации векторов \mathbf{P} и \mathbf{M} . При такой ориентации поток вектора Пойтинга входит в южную полярную шапку, что

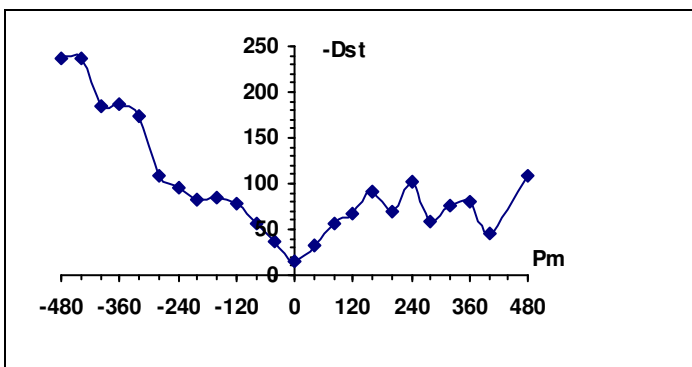


Рис. 1. Зависимость Dst -индекса от компоненты вектора Пойтинга вдоль геомагнитного момента P_m .

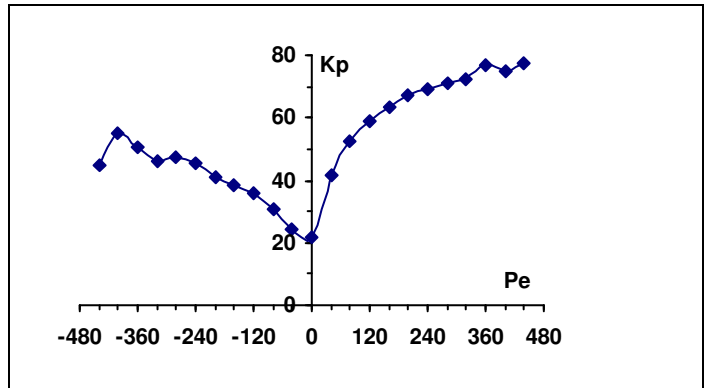


Рис. 2. Зависимость K_p -индекса от компоненты вектора Пойтинга P_e , рассчитанной на основе уравнения (3).

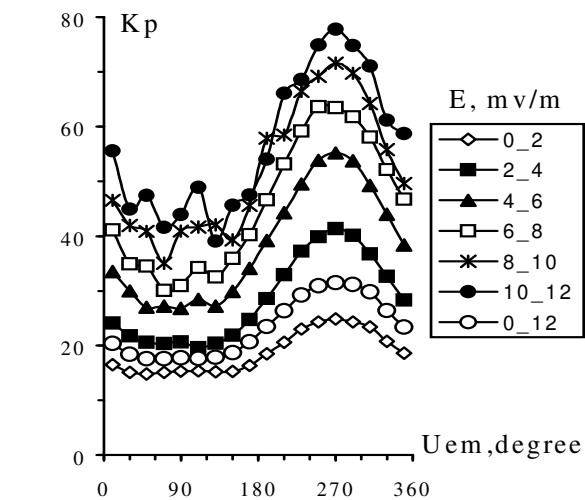


Рис. 3. Зависимость K_p индекса от угла U_{em} (градусы), рассчитанных на основе данных в 1964-2005 гг. для различных диапазонов величины E (мВ/м); диапазон 0-12 мВ/м включает все данные. Рисунок из работы [5].

предполагает существование электрического тока, описывающего диссипацию электромагнитной энергии. Во время бурь с $Dst < -100$ нТ вклад магнитных возмущений южного полушария значительно преобладает над вкладом северного полушария в Dst -индексе. Возможным объяснением этого эффекта могут быть модельные расчеты [4] которые показывают, что индукционный сигнал от полярных электроджетов существенно больше для южной полярной шапки, чем для северной. Автор объясняет этот эффект глубиной и проводимостью океана внизу полярных электроджетов. Электроджеты являются элементами трехмерных токовых систем, связывающих магнитосферу и полярную ионосферу во время Dst -возмущений, поэтому объяснение вполне естественно.

На рис. 2 показана зависимость K_p от P_e . Зависимость $K_p(P_e)$ очень похожа на зависимость $K_p(E_{mv})$, полученную в [3]: при увеличении E_{mv} -поля, направленного с утра на вечер, K_p быстро растет до значений $K_p=8$ при изменении E_{mv} от 0 до 10 мВ/м. Для бури важнее рост K_p при росте компоненты E_{mv} , направленной в обратном направлении - с вечера на утро, что, например, реализуется при $B_y=0$ и $B_z > 0$ в формуле

(4). В этом случае K_p тоже растет и достигает значений $K_p \sim 5$ при изменении величины E_{mv} от 0 до 10 мВ/м. Мы полагаем, что обсуждаемый рост K_p (как и других индексов) при $B_z > 0$ связан с пересоединением ММП северного направления на полюсной границе каспа [3]. Поскольку знак Re определяется знаком E_{mv} в (3), то рис. 2 показывает, что скорость поступления энергии к дневной магнитопаузе быстро растет при $Re > 0$ ($E_{mv} > 0$, E направлено с утра на вечер) и медленно при $Re < 0$ ($E_{mv} < 0$, E направлено с вечера на утро). На рис. 3 мы приводим зависимость K_p от угла U_{em} для различных диапазонов величины E (от 0 до 12 мВ/м), обсуждаемую в [5]. Рис. 3 показывает новую закономерность роста ГА при северном направлении ММП: K_p растет от $K_p = 4$ до $K_p = 6$ при постоянном модуле $E \sim 10$ мВ/м при повороте вектора E от $U_{em} = 90^\circ$ до $U_{em} = 0^\circ$ или $U_{em} = 180^\circ$ (от утреннего направления, перпендикулярного вектору M в плоскости YZ , до направления вдоль вектора M на север или юг). Видно, что этот рост K_p обусловлен увеличением компоненты E_m и не зависит от ее знака (при $U_{em} = 0^\circ$ и $U_{em} = 180^\circ$ $K_p = 6$), что важно для понимания механизмов рассматриваемой бури.

Аномальная буря 21-22 января 2005 года

Проанализируем более детально механизм бури, предложенный в [1]. Основываясь на факте, что с ~17 до 19 UT введенный Du et al индекс $\text{Sum}(E_y)$ увеличивался (связано в основном с наличием $B_z < 0$ и быстрым увеличением V солнечного ветра, см. рис.4), а $\text{Sum}(SYMN)$ увеличивался медленно, авторы делают вывод, что этот интервал - фаза накопления энергии ("energy storage phase"). Как видно из рис. 4, с ~17-1800 UT произошло резкое увеличение AL (интенсивности западного электроджета) до ~ -3100 нТ, что говорит о значительной диссипации энергии. Как рост индекса, так и его восстановление были достаточно быстрыми: уже к ~19 UT $AL \sim -1500$ нТ (значение, близкое AL до начала его роста). Рис. 4 показывает, что в ~1730h AU (интенсивность восточного электроджета) испытал резкий всплеск от ~200 до 750 нТ. Основное быстрое повышение AU произошло в ~1840h до ~1200 нТ,

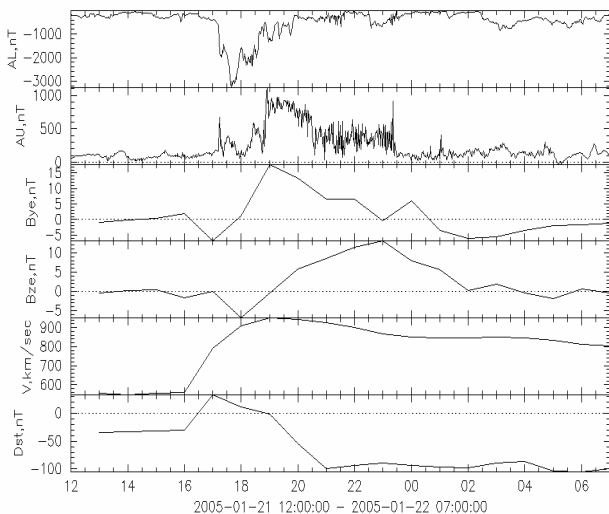


Рис. 4. Параметры солнечного ветра и ММП, AL, AU и Dst индексы во время аномальной бури 21-22 января 2005 г.

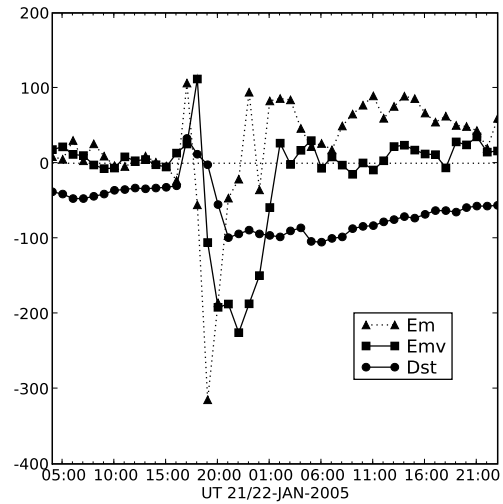


Рис. 5. Изменения компонент вектора Пойтинга во время бури 21-22 января 2005 г. Dst в нТ; компоненты P в единицах $P/(8 \cdot 10^{-7})$ [Вт/м²].

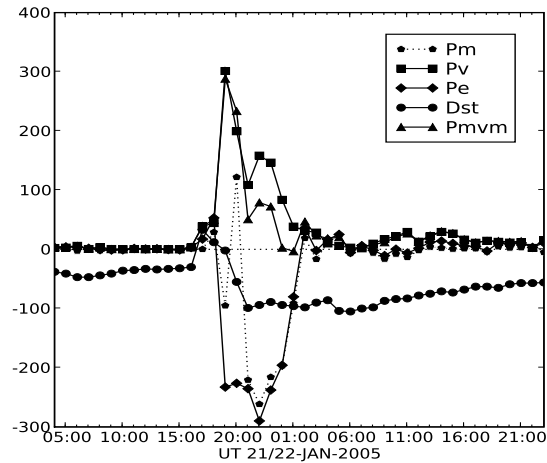


Рис. 6. Изменения компонент вектора электрического поля во время бури 21-22 января 2005 г; Dst в нТ; компоненты E в единицах $E/20$ [мВ/м].

значение которого практически не изменялось до ~20h. Таким, образом в рассматриваемый авторами интервал попадает рост AU и AL до самых больших значений. Действительно и то, в ~17-18h наблюдался рост E_{mv} компоненты до максимальных положительных значений в этой буре 5.6 мВ/м, сопровождаемый ростом $B_z < 0$ до максимальных величин в бурю $B_z \sim -6.5$ нТ, что важно для механизма в [1]. Но следует отметить, что в интервале ~17-18 UT достигнуты также самые большие в бурю положительные значения $E_m = 5.3$ мВ/м (рис. 5), что связано с ростом V_u до -7 нТ и быстрым ростом V в на рис. 4). Именно компонента E вдоль оси Z (аналог E_m у нас), по мнению автора [6], связана с пересоединением геомагнитного поля в полярных шапках с B_u ММП. Рис. 6 показывает, что в период с ~17-18h увеличились также другие компоненты вектора Пойтинга: P_m в 100 раз, а P_e в 3 раза. Эти изменения параметров, обусловили резкий рост AL-индекса. А если учесть, что $Re > 0$ (вектор

Пойтинга направлен к лобовой магнитопаузе) и $E_{mv} > 0$ (Е направлено с утра на вечер), то можно сделать вывод об увеличении скорости поступления энергии к лобовой магнитопаузе, что должно усилить процесс пересоединения на дневной стороне магнитосферы. Период отмечен общим уменьшением $Dst > 0$, значения которого уменьшились на ~ 21 нТ, достигнув величины 12 нТ. Рис. 5 показывает, что депрессия Dst началась в конце интервала $\sim 18-19$ h, который отмечен самыми большими изменениями компонент электрического поля на рис. 5. В этот период E_m увеличилась на 12.9 мВ/м и достигла своих аномально экстремальных значений $E_m = 15.7$ мВ/м (связано с экстремальными значениями $V \sim 950$ km/sec и $B_y \sim 18$ нТ, см. рис 4). Такой скачок E_m способствовал резкой интенсификации процессов пересоединения с B_y ММП. Следует отметить в этот же период попадает резкое изменение E_{mv} от положительных значений к отрицательным. Рис. 6 показывает, что этот интервал связан с наиболее резкими изменениями всех 4-х компонент вектора Пойтинга, которые были выбраны нами для описания скорости поступления энергии к магнитосфере, а P_v -компонента достигла в ~ 19 h наибольших значений для этой бури (рис. 6): $P_v = 300$ ед. $= 2.4 \cdot 10^{-4}$ Ватт/м². Мощность солнечного ветра, подводимая к магнитосфере, при этом будет $N = S \cdot P = 3.1 \cdot 10^{12}$ Ватт при радиусе магнитосферы $R_m = 10 R_e$. Следующий интервал 19-20h характеризуется депрессией DR-тока (от $Dst = 0$ до $Dst = -53$ нТ), который мы относим к началу бури (~ 1930 UT). Следует упомянуть, что в этом периоде $B_z > 0$; причем этот интервал отмечен наиболее быстрым ростом величины $B_z > 0$, который продолжался до ~ 23 h 22 января, но с меньшей скоростью (рис. 4). В следующем интервале $\sim 20-21$ h уменьшение Dst по среднечасовым данным составило ~ 44 нТ, что вызвало депрессию $Dst \sim -100$ нТ. Позже во время бури величина индекса изменялось не более, чем на 5 нТ. Абсолютный экстремум $Dst = -105$ нТ является максимальной депрессией Dst , после которой началась медленная фаза восстановления с ~ 0630 h. Временные интервалы достижения экстремальных значений компонент P и E отличаются. Так $E_m = -315$ ед. $= 15.7$ мВ/м достигла этих значений к ~ 19 h, а компоненты $P_m = -2.1 \cdot 10^{-4}$ и $P_e = -2.3 \cdot 10^{-4}$ Вт/м², $E_{mv} = -11.3$ мВ/м к ~ 22 h. Обратим внимание, что экстремум $Dst \sim -105$ нТ отмечен экстремумом $P_m < 0$, что говорит о связи поступлении энергии в южную шапку и этого минимума Dst . Обсуждаемые ранее результаты, показанные на рис. 1, дают при $P_m < 0$ большие возмущения Dst -индекса, чем при $P_m > 0$ при той же величине P_m . Таким образом, анализ показывает, что момент максимальной депрессии $Dst \sim -105$ нТ (~ 22 h) контролировался именно изменением этих компонент P и E в солнечном ветре, а не процессами диссипации в DR-ток после длительного накопления энергии. Чтобы понять влияния $B_z > 0$, запишем закон Ома в виде: $\mathbf{E} + 1/c [\mathbf{V}, \mathbf{B}] = \mathbf{J}/\sigma$, где σ - проводимость, \mathbf{J} - плотность тока, c - скорость света. Вблизи линии пересоединения магнитных полей противоположных направлений $\mathbf{B} \rightarrow 0$, в результате \mathbf{E} и \mathbf{J} имеют одно направление ($\mathbf{E}, \mathbf{J} > 0$). Таким образом, процесс пересоединения с ($\mathbf{E}, \mathbf{J} < 0$) невозможен. Известно, что

DCF токи текут на дневной низкоширотной магнитопаузе в направлении утро-вечер. Это направление токов стимулирует процесс пересоединения при E_{mv} -поле того же направления, что и токи. На высокоширотной магнитопаузе (в зоне дневного каспа) направление DCF токов меняется на противоположное, что создает условия для пересоединения при $E_{mv} < 0$ ($B_z > 0$) [3].

Выводы

Суммируя результаты анализа аномальной бури можно сказать, что полученные нами ранее статистические зависимости K_p и Dst индексов от величины и направления векторов E и P (см. секцию 2), демонстрируют ту же связь, которая наблюдалась в аномальную бурю. Результат о том, что максимальная депрессия $Dst = -105$ нТ сопровождалась максимальными скоростями поступления энергии в полярные шапки и к дневной магнитопаузе, описываемыми компонентами вектора P , четко указывает на определяющее влияние скорости поступления электромагнитной энергии солнечного ветра на развитие главной фазы бури. Показано, что необычно большие величины компоненты $E_m \sim 15.7$ мВ/м и скорости поступления электромагнитной энергии в южную полярную шапку $P_m \sim 2.4 \cdot 10^{-4}$ Вт/м² сыграли важную роль в развитии главной фазы аномальной бури, происходившей при северном направлении ММП. Изменения Dst индекса в целом следуют за изменениями компонент векторов E и P без существенной задержки по времени, определяемой среднечасовыми данными. Результат указывает на приближительное равенство скорости поступления энергии и скорости ее диссипации в магнитосфере. Возможным физическим механизмом развития главной фазы бури может быть пересоединение геомагнитного и межпланетного полей в каспах и полярных областях обоих полушарий при наличии $B_z > 0$ и B_y ММП, что усиливает межполушарную конвекцию в магнитосфере и, следовательно, трехмерную токовую систему, связывающую токи вдоль силовых линий, токи полярной ионосферы и ближнего плазменного слоя.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Du, A. M., B. T. Tsurutani, and W. Sun, Anomalous geomagnetic storm of 21–22 January 2005: a storm main phase during northward IMF, *J. Geophys. Res.*, 113, A10214, doi:10.1029/2008JA013284, 2008.
- [2] Kuznetsova T.V. and Laptukhov A.I. A study of magnetopause dynamics and magnetospheric state in case of reconnection between the Earth's magnetic field and an IMF of arbitrary orientation. In book: *New and Old Problems in Physics and Geophysics*, Science, Germany, pp. 10-26, 2002.
- [3] Кузнецова Т.В., Лаптухов А.И., Кузнецов В.Д. Учет геометрии взаимодействия солнечного ветра с магнитным полем Земли в геоэффективных параметрах и прогнозе геомагнитной активности. *Астрономический Вестник*, том 40, стр. 561-568, 2006.
- [4] Kuvshinov A.V. 3-D global induction in the oceans and solid Earth: recent progress in modeling Magnetic and Electric fields from sources of magnetospheric, ionospheric and oceanic origin. *Surv. Geophys.*, doi: 10.1007/s10712-008-9045-z, 2008.
- [5] Kuznetsova T. V., A. I. Laptukhov and V. D. Kuznetsov. Contribution of geometry of interaction between interplanetary and terrestrial magnetic fields into geomagnetic activity. *Proceedings International Astronomical Union Symposium N233 Solar Activity and its Magnetic Origin*, 31 March - 3 April 2006, Cairo, Egypt, Eds. Volker Bothmer & Ahmed Abdel Hady, Vol. 2, pp. 407-409, 2006.
- [6] Stern D. A study of the electric field in an open magnetospheric model. *J. Geophys. Res.*, v. 78, N31, pp. 7292-7305, 1973.