

УДК 550.385.4

© 1996 г. Я.И. Фельдштейн, А. Графе

ЭНЕРГЕТИКА МАГНИТОСФЕРЫ НА РАЗЛИЧНЫХ ФАЗАХ МАГНИТНОЙ БУРИ

Определение энергетического баланса в магнитосфере на различных фазах магнитной бури показало, что в главную фазу бури джоулева диссипация энергии в авроральной ионосфере U_j находится на том же уровне или даже больше, энергии инжекции в кольцевой ток U_{DR} . Величина U_j больше U_{DR} на фазе восстановления магнитной бури. В предположении, что токи в "хвосте" магнитосферы вносят заметный вклад в наблюдаемые на поверхности Земли в низких широтах вариации геомагнитного поля во время главной фазы бури, энергия плазмы в кольцевом токе должна быть еще уменьшена по крайней мере вдвое.

Оценки показывают, что диссипация энергии во внутренней магнитосфере и в ионосфере, вычисленная на основе соотношения $U_T = U_{DR} + 2(U_j + U_A)$, где U_A есть мощность, связанная с корпускулярными вторжениями, существенно отличается от функции ϵ . На главной фазе бури $\epsilon > U_T$, $U_T > \epsilon$ на фазе восстановления. В предположении, что функция ϵ характеризует скорость введения энергии внутрь магнитосферы, уравнение энергетического баланса должно быть дополнено членом U_M , который характеризует поступление энергии в "хвост" магнитосферы.

Введение

В [1–4] рассмотрены основные процессы накопления и диссипации энергии внутри земной магнитосферы во время геомагнитных возмущений. В [5] рассмотрен энергетический баланс магнитосферы как в магнитноспокойные интервалы, так и во время магнитосферных суббурь. Суммарная мощность, диссипирующая внутри магнитосферы U_T , есть сумма трех членов:

$$U_T = U_{DR} + 2(U_j + U_A), \quad (1)$$

где U_{DR} есть инжекция мощности в кольцевой ток; U_j есть мощность джоулевой диссипации в высокоширотной ионосфере; U_A – мощность, связанная с корпускулярными вторжениями. Коэффициент 2 в соотношении (1) учитывает диссипацию энергии в двух полушариях. Член U_j включает в себя две компоненты: $U_{\text{ком}j}$ связана с квази-

стационарной конвекцией, а $U^{субj}$ – с токовыми системами суббури. Член $U^{конj}$ контролируется "вязким" трением между солнечным ветром и магнитосферой. Его величина (см. [5]) вычисляется из соотношения $U_j^{кон} = \iint \sum G_p E^2 ds$,

где интегрирование ведется по всей поверхности высокоширотной ионосферы, ΣG_p – интегральная по высоте проводимость Педерсена; E – квазистационарное электрическое поле, напряженность которого принята по [6]. Другие члены в (1) в Вт вычислялись по соотношениям, полученным в [7, 8, 1]

$$U_A = 1,75(AE/100 + 1,6) \cdot 10^{10} \quad (2)$$

$$U^{субj} = 3,2 \cdot 10^8 AE \quad (3)$$

$$U_{DR} = 0,74 \cdot 10^{10} [dDR/dt + DR/\tau]. \quad (4)$$

Здесь AE есть индекс интенсивности авроральных электроструй в нТл; DR – магнитное поле кольцевого тока на поверхности Земли; τ – параметр распада кольцевого тока. В течение магнитных бурь авроральные электроструи смещаются на субавроральные широты. Интенсивность AE в (2) и (3) должна определяться с учетом такого смещения. Для этого потребуется дополнительно к данным авроральных обсерваторий привлечение магнитного поля на субавроральных станциях [9, 10].

В предположении, что вариация Dst есть сумма полей токов на магнитопаузе (DCF) и кольцевого тока в магнитосфере (DR), можно записать

$$DR = Dst - DCFd + DCFq,$$

где индексы d и q обозначают соответственно возмущенные и спокойные условия, а значения $DCFd$ и $DCFq$ определяются на основе эмпирических соотношений между DCF и давлением солнечного ветра на магнитосферу.

При таком определении DR включает также магнитные эффекты токов в "хвосте" магнитосферы. Значения τ в (4) взяты, согласно [11]. Вычисления AE -индексов, включая данные субавроральных обсерваторий, процесс достаточно трудоемкий. Поэтому ниже рассмотрен баланс энергии в магнитосфере для интервалов двух магнитных бурь, для которых в [9, 10] получены AE -индексы, учитывающие экваториальное смещение электроструй.

Диссипация энергии во время магнитных бурь

а. Магнитная буря 31 марта – 3 апреля 1973 г.

На рис. 1 приведены вариации AE и DR для бурь 31 марта – 3 апреля 1973 г. (рис. 1а) и 23–24 марта 1969 г. (рис. 1б). Эти ежечасные значения индексов служили для определения U_j , U_A , U_{DR} и U_T в соответствии с (1–4). На рис. 2 приведены вариации U_j , U_A , U_{DR} и U_T в интервале с 12 UT 31 марта до 04 UT 3 апреля 1973 г. одновременно с инжектируемой в магнитосферу мощностью из солнечного ветра – функции ϵ [12, 13]. Рассматриваемый интервал включает магнитосферную суббурю (17–20 UT 31 марта) и интенсивную магнитную бурю (после 12 UT 1 апреля 1973 г.). В интервале суббури и до начала интенсивной инжекции плазмы в кольцевой ток (~14 UT 1 апреля) диссипация энергии в авроральной ионосфере превосходит инжекцию в кольцевой ток. Резкое усиление DR в главной фазе бури (15–22 UT 1 апреля) сопровождается увеличением U_{DR} до $6 \cdot 10^{11}$ Вт, что сопоставимо с величиной U_j . На фазе восстановления (после 22 UT) значение U_j явно превосходит U_{DR} . Суммарная инжекция в кольцевой ток за интервал главной фазы бури между 07 и 21 UT ~ $1,8 \cdot 10^{16}$ Дж, соответственно на фазе восстановления до 04 UT 3 апреля ~ 10^{16} Дж. Для джоулевой диссипации эти значения составляют соответственно $2,2 \cdot 10^{16}$ и $2,6 \cdot 10^{16}$ Дж. Таким образом, на главной фазе магнитной бури инжекция энергии в кольцевой ток примерно такая же,

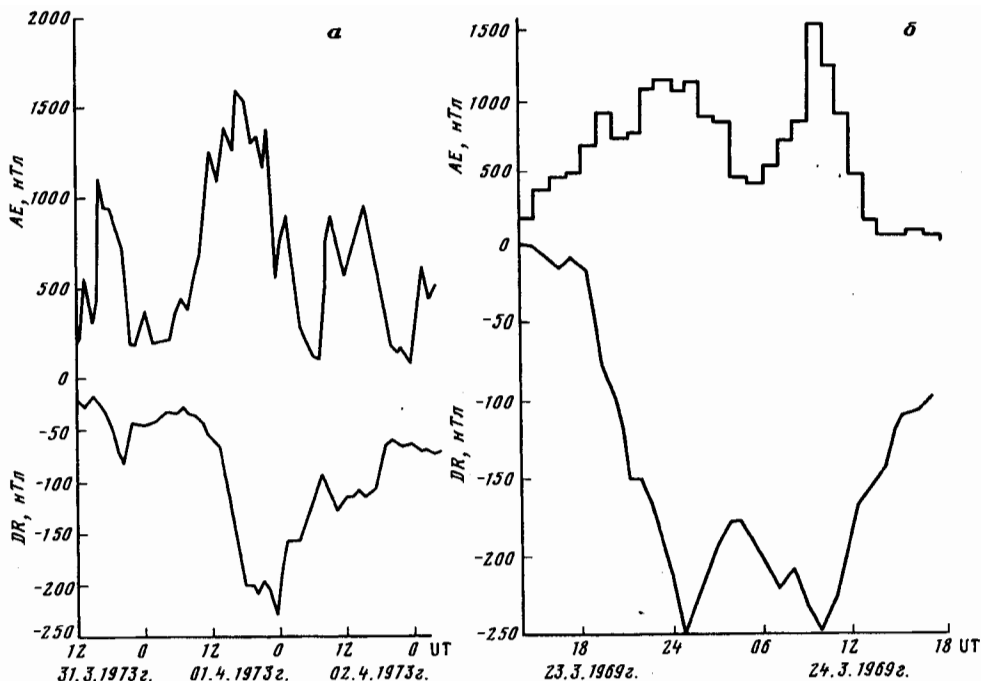


Рис. 1. а – вариации индексов AE и DR для бури 31 марта – 3 апреля 1973 г. [10]; б – аналогично для бури 23–24 марта 1969 г. [9]

как и джоулева диссипация. На фазе восстановления U_j превосходит U_{DR} . За интервал бури выделение энергии в авроральной ионосфере в двух полушариях заметно превосходит энергию, инжектируемую в кольцевой ток. Величины U_A , как правило, меньше U_j , но сопоставимы с U_{DR} на фазе восстановления.

б. Магнитная буря 23–24 марта 1969 г.

На рис. 3 приведены вариации энерговыделения от различных источников для магнитной бури 23–24 марта 1969 г. Их поведение аналогично для бури 1 апреля 1973 г. До начала интенсивной инжекции в кольцевой ток (18 UT 23 марта) $U_j > U_{DR}$. Резкое усиление DR после 18 UT приводит к увеличению $U_{DR} \approx 10^{12}$ Вт, что несколько больше $U_j \sim 7 \cdot 10^{11}$ Вт. $U_j \gg U_{DR}$ на фазе восстановления (после 10 UT 24 марта). Суммарная инжекция в кольцевой ток в течение всей главной фазы бури $\sim 2,7 \cdot 10^{16}$ Дж, а на фазе восстановления между 10 и 17 UT 24 марта инжекция составляет $\sim 1,5 \cdot 10^{15}$ Дж. Соответствующие величины джоулевой диссипации составляют $\sim 3,0 \cdot 10^{16}$ и $7 \cdot 10^{15}$ Дж.

На рис. 3 (внизу) приведены результаты сопоставления суммарной энергии, диссипировавшей во внутренней магнитосфере и ионосфере U_T , вычисленной по соотношению (1), и энергии, инжектированной внутрь магнитосферы из солнечного ветра, оцениваемой параметром ϵ . В обеих бурях $U_T > \epsilon$ до и после главной фазы бури, $\epsilon > U_T$ на главной фазе бури. Интегральное значение ϵ ($\Sigma\epsilon$) примерно в 2 раза превосходит интегральное значение U_T (ΣU_T) в главную фазу магнитной бури. Однако ΣU_T в 1,4 раза больше $\Sigma\epsilon$ за интервал фазы восстановления.

Дискуссия и резюме

В течение главной фазы магнитной бури U_j примерно такой же величины, что и энергия, вводимая в магнитосферу в виде кольцевого тока U_{DR} . Этот результат явился следствием как использования исправленных значений AE -индексов (принято

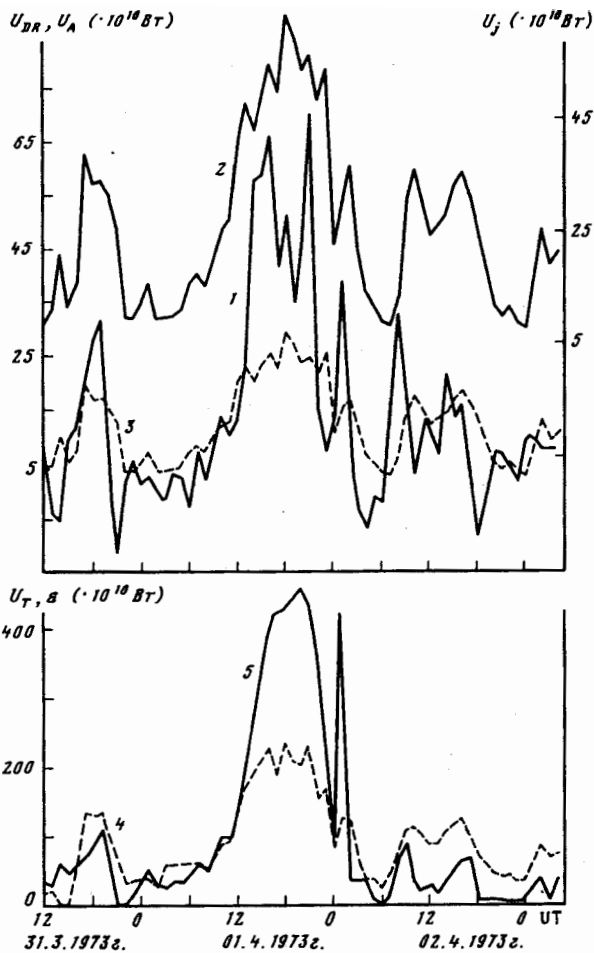


Рис. 2. Вариации U_{DR} (1); $U_j = U_j^{кон} + U_j^{суб}$ (2); U_A (3); U_T (4) и ϵ (5) для интервала магнитной бури 31 марта – 3 апреля 1973 г.

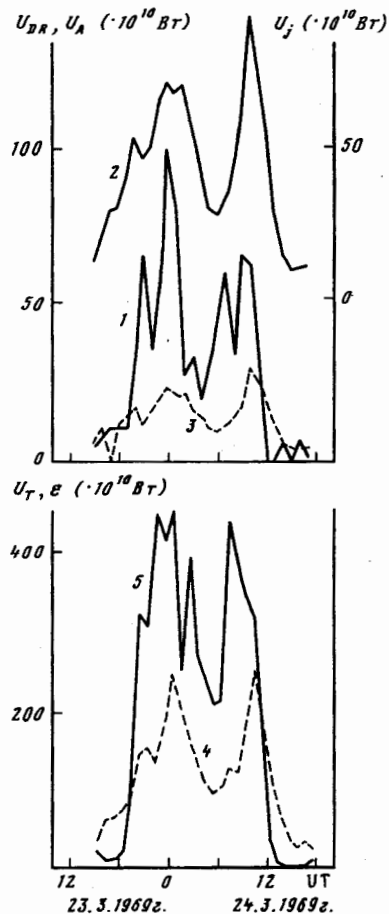


Рис. 3. Аналогично рис.2, но для интервала магнитной бури 23–24 марта 1969 г.

во внимание смещение электроструй к экватору), так и более тщательного отбора используемых для расчетов значений параметров распада кольцевого тока. Таким образом, даже для главной фазы интенсивной магнитной бури введенная в авроральную ионосферу энергия, диссипировавшая в виде джоулева тепла в ионосфере, сопоставима с энергией, введенной в кольцевой ток. Это заключение станет тем более обоснованным, если принять во внимание вклад токов "хвоста" магнитосферы в наблюдаемые на поверхности Земли во время магнитной бури вариации магнитного поля (H_x). Для бури 23–24 марта 1969 г. интенсивность H_x и H_{DR} вычислялась в [14], и H_x оказалась по интенсивности примерно равной H_{DR} . Это означает, что приведенные выше оценки U_{DR} завышены, по крайней мере, примерно вдвое, и, следовательно, заметная часть вводимой в магнитосферу энергии расходуется на увеличение магнитной энергии в виде магнитного потока, формирующего "хвост" магнитосферы.

Если инжектируемая в магнитосферу энергия оценивается функцией ϵ , то в интервале главной фазы магнитной бури должен существовать дополнительный механизм диссипации энергии в магнитосфере. По-видимому, не вся поступающая в магнитосферу энергия диссипирует внутри нее. Часть этой энергии вместе с плазмой

возвращается непосредственно в солнечный ветер. Другим возможным процессом диссипации энергии, запасенной в "хвосте" магнитосферы, является ее дальнейший выброс в солнечный ветер вместе с плазмой [15]. В этом случае в уравнение баланса энергии внутри магнитосферы должен быть введен член U_M , учитывающий скорость накопления магнитной энергии внутри "хвоста" магнитосферы. В результате уравнение баланса энергии имеет следующий вид:

$$U_T = U_{DR} + 2(U_j + U_A) + U_M. \quad (5)$$

Накопление энергии в "хвосте" происходит в результате преобладания процесса пересоединения на дневной магнитопаузе над пересоединением в "хвосте". На фазе восстановления магнитной бури запасенная в "хвосте" магнитная энергия частично преобразуется в энергию авроральных частиц и продольных токов, в конечном счете диссипирующих в верхней атмосфере.

Количественная оценка U_M в (5) может быть сделана на основе измерений магнитного потока, формирующего "хвост" магнитосферы. Этот поток проектируется на высокоширотную область верхней атмосферы к полюсу от экваториальной границы овала полярных сияний. Оценки в [16] показали, что для составления энергетического баланса процессов в земной магнитосфере в периоды возмущений необходимо принимать во внимание член U_M . Для рассмотренных главных фаз магнитных бурь в предположении, что $U_j \approx U_{DR}$ и $\epsilon \approx 6U_{DR}$, получаем $U_M \approx 3U_{DR}$, если вся вводимая в магнитосферу энергия диссипирует внутри нее. Как обсуждалось выше, часть энергии может просто "прокачиваться" через магнитосферу без диссипации. В этом случае $U_M < 3U_{DR}$, и разность равна величине энергии, поступающей в магнитосферу из солнечного ветра, но не диссипирующей внутри нее. Оценки показывают, что ситуация внутри земной магнитосферы вполне возможно такова, что только малая часть вводимой в магнитосферу энергии диссипирует в виде джоулевого нагрева и генерации кольцевого тока. Большая ее часть запасается в "хвосте" магнитосферы. Это утверждение основывается на предположении, что вся вводимая в магнитосферу из солнечного ветра энергия диссипирует в различных областях магнитосферы, от ионосферы до ее "хвоста".

Исследование проводилось при поддержке Немецкого Научного Общества по проекту MASRAEL и РФФИ (грант 96-05-66279).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Akasofu S.-I. Energy coupling between the solar wind and the magnetosphere // Space Sci. Rev. 1981. V. 28. P. 121.
2. Stern D.P. Energetics of the magnetosphere // Space Sci. Rev. 1984. V. 39. P. 193.
3. Baker D.N., Akasofu S.-I., Baumjohan W. et al. Substorms in the magnetosphere // Solar-Terrestrial Physics-Present and Future / Ed D.M. Butler and K. Papadopoulos. 1984. Washington: NASA. Chapt. 8. P. 1.
4. Weiss L.A., Reiff P.H., Moses J.J. et al. Energy dissipation in substorms. Proc. Intern. Conf. Substorms. Kiruna. 23-29 March. 1992. P. 309.
5. Feldstein Y.I., Levitin A.E., Pissarsky U.Yu. et al. Energy regimes in the earth's magnetosphere // Studia Geophys. et Geodet. 1986. V. 30. P. 268.
6. Левитин А.Е., Фельдштейн Я.И., Афонина Р.Г. и др. Крупномасштабная структура электрических полей и токов. М.: Гидрометеиздат, 1984. Ч. 1. P. 6.
7. Spiro R.W., Reiff P.H., Maher L.J. Precipitating electron energy flux and auroral zone conductance – an empirical model // J. Geophys. Res. 1982. V. 87. P. 8215.
8. Baumjohan W., Kamide Y. Hemispheric joule heating and the AE index // J. Geophys. Res. 1984. V. 89. P. 383.
9. Сумарук П.В., Фельдштейн Я.И., Белов Б.А. Динамика магнитосферной активности в период интенсивной магнитной бури // Геомагнетизм и аэронавигация. 1989. Т. 29. № 1. С. 110.
10. Feldstein Y.I., Levitin A.E., Golyshev S.A. et al. Ring current and auroral electrojets in connection with interplanetary medium parameters during magnetic storm // Ann. Geophys. 1994. V. 12. P. 602.
11. Feldstein Y.I. Modelling of the magnetic field of magnetospheric ring current as a function of interplanetary medium // Space Sci. Rev. 1992. V. 59. P. 83.
12. Perreault P., Akasofu S.-I. A study of geomagnetic storms // Geophys. J. Roy. Astron. Soc. 1978. V. 54. P. 547.

13. Пудовкин М.И., Семенов В.С. Об энергетической функции Акасофу // Геомагнетизм и аэрономия. 1986. Т. 26. № 4. С. 1026.
14. Алексеев И.И., Калегаев В.В., Фельдштейн Я.И. Моделирование магнитного поля в сильно возмущенной магнитосфере // Геомагнетизм и аэрономия. 1992. Т. 32. № 1. С. 8.
15. Baker D.N., Fairfield D.H., Slavin J.A. et al. The substorm event of 28 January 1983: a detailed global study // Planet. Space Sci. 1990. V. 38. P. 1495.
16. Frank L.A., Craven J.D. Imaging results from Dynamic Explorer 1 // Rev. Geophys. 1988. V. 26. P. 249.

Институт земного магнетизма,
ионосферы и распространения
радиоволн РАН

Центр Наук о Земле

Поступила в редакцию
24.11.95