

ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА СОБЫТИЙ КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ ДЛЯ ПЕРИОДА 2011 - 2012

Петър Тонев¹, Петър Велинов¹, Мария Димитрова¹, Лъчезар Матеев¹, Йордан Тасев¹,
Мария Абунина², Анатолий Абунин², Анатолий Белов², Сергей Гайдаш²

¹Институт за космически изследвания и технологии – Българска академия на науките

²Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова
(ИЗМИРАН) Российской академии наук
e-mail: ptonev@bas.bg

Ключови думи: Космическая погода, солнечный ветер, кинетическая энергия, магнитная энергия, термальная энергия, индексы геомагнитной активности, геомагнитная буря

Резюме: Получена оценка вариаций кинетической, магнитной и термальной энергий солнечного ветра и переносимым им магнитным полем перед их взаимодействием с магнитосферой Земли как при спокойных условиях, так и в периодах геомагнитных бурь в 2011-2012 годах. Для этих периодов проведено сопоставление изменений трех энергий во времени с вариациями геомагнитных индексов AE и Dst, с учетом влияния компоненты Bz межпланетного магнитного поля. На базе проведенных соответствий сделаны предварительные выводы о функциональных связях между тремя энергиями и индексами AE и Dst. Эти результаты могут быть полезными в дальнейшем при разработки новых методов прогнозирования космической погоды.

ENERGETICAL ESTIMATION OF SPACE WEATHER EVENTS DURING 2011-2012

Peter Tonev¹, Peter Velinov¹, Maria Dimitrova¹, Lachezar Mateev¹, Yordan Tassev¹,
Maria Abunina², Anatoly Abunin², Anatoly Belov², Sergey Gaidash²

¹Space Research and Technology Institute – Bulgarian Academy of Sciences

²Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere, and Radio Wave Propagation 'N.V. Pushkov' (IZMIRAN), Russian Academy of Sciences
e-mail: ptonev@bas.bg

Keywords: Space weather, solar wind, kinetic energy, magnetic energy, thermal energy, geomagnetic activity indices, geomagnetic storm

Abstract: An estimation is obtained of variations of the kinetic, magnetic and thermal energies of the solar wind and the interplanetary magnetic field (IMF) linked to it before their interaction with the Earth's magnetosphere during quiet conditions, as well as in geomagnetic storm periods in 2011-2012. A comparison is made of temporal variations of the three energies with variations of the geomagnetic indices AE and Dst, taking into account the influence of the IMF Bz component. On the base of this comparison preliminary conclusions are made about functional relations between the three energies and indices AE and Dst. These results can be used further to create new methods for space weather forecasting.

Введение

Солнечный ветер (СВ) и переносимое им межпланетное магнитное поле **B** (ММП) взаимодействуют с Земной магнитосферой так, что их вариации определяют геомагнитные условия. Рассматривая ситуацию в плане энергий, при взаимодействии с Землей система СВ - ММП вносит в магнитосферу часть своей энергии, что в итоге приводит к вариациям геомагнитной активности. Энергетический подход стоит в основе различных теорий [1] и моделей [2] солнечного ветра и исследований его распространения в солнечной системе [3]. Цель настоящей работы – сделать сопоставление между вариациями энергий системы СВ - ММП непосредственно перед взаимодействием с магнитосферой Земли и вызванными ими

вариациями геомагнитной активности в периодах геомагнитных бурь в периоде 2011-2012 года. Рассматриваются три энергетические компоненты - соответственно, кинетическая, магнитная и термальная энергии с пространственными плотностями E_K , E_M , E_T в виде:

$$(1) \quad E_K = 3/2 N k T_p;$$

$$(2) \quad E_M = |\mathbf{B}|^2 / 2\mu_0;$$

$$(3) \quad E_T = 1/2 N |\mathbf{V}|^2.$$

Здесь \mathbf{V} , $T = T_p$ и N – вектор скорости, температура (протонная) и плотность плазмы СВ, k – константа Больцмана, μ_0 – магнитная проницаемость для вакуума.

Сначала нами оценены плотности энергий (1) - (3) в первой точке Лагранжа системы Солнце-Земля при спокойных геомагнитных условиях для получения базовых энергетических параметров СВ и ММП, приводящих к таким условиям. Далее исследованы вариации энергий (1) – (3) в периодах геомагнитной бури, с целью установить как эти вариации влияют на геомагнитные индексы AE и Dst.

Это исследование полезно, во первых, для получения энергетической оценки системы СВ – ММП с учетом их вариаций при различных условиях, отражающих процессов на Солнце. Далее, оно может быть шагом к систематическому и адекватному описанию реакции магнитосферы на изменяющиеся условия межпланетной среды.

Использованные данные

Здесь используются данные параметров СВ (скорость ветра \mathbf{V} с компонентами V_x , V_y , V_z , плотность плазмы N , протонная температура T_p) и ММП \mathbf{B} с компонентами B_x , B_y , B_z , измеренные на космической станции ACE, расположенной в первой точки Лагранжа - на расстоянии около 1.5 миллионов километров от Земли (~ 0.01 AU) в сторону Солнца. Используются данные, представленные в координатной системе GSM. Данные брались из сайта <http://www.srl.caltech.edu/ACE/ASC/level2/index.html>. Предполагаем, что при пространственных и временных масштабах структур СВ и ММП данные с позиции ACE представительны для описания их характеристик непосредственно перед взаимодействием с магнитосферой. Используются также данные различных геомагнитных индексов на период 2011-2012 годов. Это почасовые индексы Dst, характеризующий изменений магнитного поля в результате вариаций экваториального кругового тока и AE, характеризующий геомагнитную активность в авроральных областях, а также трех-часовой планетарный индекс Kp и вычисляемый из его значений суточный планетарный индекс Ap. Эти индексы получались из сайта <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dstae/index.html>. Разработана компьютерная программа для получения данных и определяемых из них характеристик для задаваемых периодов времени, а также статистических оценок для выбранных данных в удобном виде (таблицы наперед заданного вида).

Результаты и анализ

Сначала мы исследовали наличие связей между временными вариациями энергий СВ и ММП и геомагнитной активности, которую оценивали с помощью индексов Dst и AE. В качестве базы для сравнения сначала сделана оценка энергий E_K , E_M и E_T , характеризующих СВ и ММП при спокойных геомагнитных условиях. В качестве продолжительного спокойного периода рассмотрен месяц декабрь 2012 года: индекс Ap не превышает 8 на все сутки, кроме одной, на которой он достиг максимума 12. Трехчасовой индекс Kp редко превышал 2+ и только в два 3-часовых интервала достиг максимума Ap = 4-. За этот месяц средние плотности энергий E_K , E_M и E_T составили, соответственно, $E_{Kcp} = 4.8 \times 10^{-10} \text{ J.m}^{-3}$, $E_{Mcp} = 8.9 \times 10^{-12} \text{ J.m}^{-3}$, $E_{Tcp} = 5.1 \times 10^{-12} \text{ J.m}^{-3}$, а максимальные значения были $E_{Kmax} = 2.1 \times 10^{-9} \text{ J.m}^{-3}$, $E_{Mmax} = 5.1 \times 10^{-11} \text{ J.m}^{-3}$, $E_{Tmax} = 4.5 \times 10^{-11} \text{ J.m}^{-3}$. За первые две недели месяца (1-14 декабря 2012) условия были вполне спокойными и соответствующие оценки меньше: средние значения $E_{Kcp} = 2.1 \times 10^{-11} \text{ J.m}^{-3}$, $E_{Mcp} = 2.9 \times 10^{-13} \text{ J.m}^{-3}$, $E_{Tcp} = 1.7 \times 10^{-13} \text{ J.m}^{-3}$, а максимальные значения - $E_{Kmax} = 5.1 \times 10^{-10} \text{ J.m}^{-3}$, $E_{Mmax} = 5.5 \times 10^{-12} \text{ J.m}^{-3}$, $E_{Tmax} = 5.8 \times 10^{-12} \text{ J.m}^{-3}$ (определялись максимумы средних почасовых значений, в соответствии с характеристиками, использованными дальше). Последние оценки можно принять как базовые для спокойных условиях, так как выбранный период (14 дней) намного длиннее продолжительности отдельных бурь, при которых исследуем вариации энергий. Для получения более представительной оценки нужно рассмотреть достаточное число спокойных периодов.

Далее рассматривались периоды высокой геомагнитной активности в 2011-2012 годах, характеризующиеся значениями суточного планетарного индекса $Ap > 39$. Эти периоды, брались во внимание при условии, что наличны данные, необходимые для расчета энергий.

Число таких периодов – 12; они представлены в Таблице. Кроме максимального суточного индекса A_p на рассматриваемый период, представлено также соответствующее значение $A_{24\max}$, определенном на 8 последовательных трехчасовых интервалах из этого периода с максимальными K_p . Во всех случаях $A_{24\max} > 39$. Из-за отсутствия данных для оценки E_K и E_T , не включен лишь один период, с 7-го по 10-го марта 2012 года, на котором A_p достиг максимума за 2011-2012 год ($A_p = 87$). Каждый период определялся по следующему правилу: его начало бралось за 6 часов до того как индекс K_p впервые достиг значение, не меньшее 5-, а конец периода отмечался через 6 часов после последнего 3-часового интервала с $K_p \geq 5$.

Рассматривается изменение во времени следующих характеристик СВ и ММП перед магнитосферой: плотности кинетической E_K магнитной E_M и термальной E_T энергий и компоненты B_z магнитного поля (из-за ее влияния на эффективность пересоединения, т.е. на количество энергии, получаемой магнитосферой). Поскольку временной масштаб крупномасштабных процессов взаимодействия СВ и ММП - порядка с часов до суток (с чем согласуется использование одночасовых индексов AE и Dst), то мы использовали при анализе почасово усредненные величины. Для достаточно точной оценки этих средних значений они вычислялись по 5-минутным значениям характеристик, интерполированных по измеренным данным с минимальным шагом по времени Δt . Этот способ усреднения характеристик применен из-за того, что различные величины измеряются с различным минимальным шагом по времени: $\Delta t = 64$ и 240 s, соответственно, для скорости V солнечного ветра и магнитного поля B ; $\Delta t = 300$ s для плотности плазмы N и температуры T (для N и T использованы данные непосредственных измерений). Для оценки реакции магнитосферы на изменения плотностей энергий E_K , E_M и E_T в рамках каждого рассматриваемого периода одновременно исследовался временной ход почасовых значений геомагнитных индексов Dst и AE .

Из Таблицы видно, что как максимальные, так и средние значения энергий во время бурь во много раз превышают соответствующие значения при спокойных условиях. В особенности, при энергии E_M и E_T эти соотношения могут достигать одного порядка и больше.

Для каждого из 12 периодов, представленных в Таблице на Рис.1-3 иллюстрируются результаты сопоставления временных вариаций энергетических характеристик СВ и ММП с вариациями геомагнитных индексов AE и Dst с учетом изменений компоненты магнитного поля B_z . На Рис.1 представлены случаи периодов (1) - (4), на Рис.2 - случаи периодов (5) - (8), а на Рис.3 – случаи периодов (9) - (12). В каждом отдельном случае характеристики представлены в трех панелях: в верхней панели показаны плотности кинетической E_K (черная кривая), магнитной E_M (красная кривая) и термальной E_T (синяя кривая) энергий; в средней панели представлена компонента B_z ; в нижней панели - индексы AE (в синем) и Dst (в черном). В верхней панели E_M и E_T учитываются по левой ординате, а E_K – по правой. В нижней панели Dst учитывается по левой ординате, а AE – по правой. По абсциссе (общая для трех панелей) учитывается время в часах с начала конкретного периода.

Сравнение трех энергий показывает, что кинетическая энергия - самая большая из трех - часто более чем на один порядок больше магнитной, которая следующая по величине. Это согласуется с выводами [1]. Хотя и редко, имеет место $E_K \sim E_M$, напр. в случае (5) (Рис.2). Самая малая – термальная энергия. Магнитная энергия обычно намного больше термальной энергии, особенно в периодах большой геомагнитной активности, напр. (4), (5), (8), но есть случаи когда они сравнимы или $E_T > E_M$. В каждом из рассмотренных периодов характерно резкое повышение всех трех энергий перед началом геомагнитной бури. Пиковые плотности энергий E_M и E_T – в несколько раз (вплоть до одного порядка) больше соответствующих максимальных значений при спокойных условиях, Это характерно и для кинетической энергии, но в отдельных случаях, как в (12), $E_{K\max}$ может быть сравнимым с максимумом при спокойных условиях. В этом исследовании основное внимание уделено поведению кинетической и магнитной энергий.

Из случаев, рассмотренных на Рис.1-3, наблюдается наличие нескольких характерных соответствий между рассматриваемыми характеристиками в периоде магнитной бури. Она обычно предшествуется быстрым достижением максимумов двух энергий, кинетической и магнитной; часто эти первые максимумы E_K и E_M – самые большие по всему периоду. В выбранных случаях мы прослеживали как вариации плотностей энергий СВ - ММП и B_z соотносятся с следующими характеристиками изменения геомагнитных условий во время бури:

- Экстремумы геомагнитных индексов AE и Dst и их соответствие по времени с E_K , E_M и B_z ;
- Временные масштабы изменений индексов на различных фазах.

Сначала рассмотрено поведение индекса AE , возрастания которого указывает на увеличение геомагнитной активности в авроральных областях и на возникновение суббурь [4]. Из данных видно, что этот индекс, как правило, возрастает почти непосредственно после увеличения энергий E_K и E_M СВ перед магнитосферой (~1 час после регистрации на ACE). Это отражает быструю реакцию продольных и замыкающих токов на изменения СВ.

Таблица. Максимальные и средние значения плотностей энергий E_K , E_M и E_T в периодах геомагнитных бурь за 2011 - 2012 годов.

Период	A_p _{max} A_p _{24max}	$E_K \times 10^{12}$ [Jm ⁻³], max, (max ₂) среднее	$E_M \times 10^{12}$ [Jm ⁻³], max, (max ₂) среднее	$E_T \times 10^{12}$ [Jm ⁻³], max, (max ₂) среднее
Спокойные условия (01-14.12.2012)	8 (Kp≤3-) 10	510 21	5.5 0.29	5.8 0.17
27.05.2011, 18 UT - 29.05.2011, 21UT	45 49	1630, 1400 884	47.9, 41.6 24.1	44.3, 42.0 14.9
05.08.2011, 12UT - 06.08.2011, 12UT	42 65	1630 944	47.9 35.9	44.3 8.1
09.09.2011, 06UT - 11.09.2011, 06UT	40 49.5	1940, 1905 602	124, 88 36.8	36.9, 38.0 11.1
26.09.2011, 06UT - 28.09.2011, 09UT	38 54.5	3140, 2950 425	303 40.7	5.9 2.2
24.10.2011, 12UT - 25.10.2011, 21UT	38 60.6	3580 627	210, 204 99.3	106 14.7
15.03.2012, 06UT - 18.03.2012, 06UT	36 41.8	1740, 1420 220	75.3 14.8	36.8 3.2
23.04.2012 12UT - 25.04.2012 09UT	41 47.9	1140 430	91.3 63.6	44.2 15.1
16.06.2012 15UT - 18.06.2012 12UT	43 51.1	5060, 4150 1310	520, 475 128	42.9 11.5
08.07.2012 18UT - 10.07.2012 00UT	42 52	915 260	53.6 32.3	7.5 3.2
14.07.2012 12UT - 17.07.2012 12UT	78 86.1	6360, 5230 85.7	225 69.5	138 14.5
08.10.2012 00UT - 10.10.2012 03UT	46 58.9	1850, 1620 487	95.7 55.8	28.8 7.48
12.10.2012, 21UT - 14.10.2012, 00UT	47 49	664 34.2	59.0 23.4	15.1 3.5

На Рис.1-3 видно, что самые большие максимумы АЕ ($A_{E_{max}}$) достигаются в случаях (2) и (4), когда E_K и E_M также достигают больших максимальных значений (в случае (2) их максимумы также совпадают по времени; подобен ему случай (6)). Кроме того, при достижении максимумов энергий E_K и E_M компонента ММП B_z имеет большие отрицательные значения – это видимо ключевой фактор для достижения больших значений АЕ. Это валидно и в случаях (3), (7). Хотя и случаи (4) и (5) близки по величинам максимумов E_K и E_M , в случае (5) B_z не принимала большие отрицательные значения при достижении E_{Kmax} и поэтому $A_{E_{max}}$ меньше, чем в случае (4). Подобно случаю (5), в случаях (8) и (10) достигаются большие максимальные плотности энергий E_{Kmax} и E_{Mmax} , но АЕ возрастает к максимуму лишь при больших отрицательных значениях B_z и, одновременно, больших значениях энергий E_K и E_M . Индекс АЕ большой вариабильности - он быстро реагирует на изменения параметров СВ и ММП, поэтому характеризуется большими значениями градиента по времени и обычно не остается большим на долгое время. Интересное исключение - случай (9): хотя плотности энергий E_K и E_M довольно малые, в конце периода индекс АЕ становится большим (около 1200 nT) и остается таким в течении нескольких часов, Возможная причина: B_z задержалась отрицательной и большой в течении длинного периода (15 часов), что дало возможность эффективному поступлению энергии в магнитосферу на долгий период и изменению условий формирования авроральных токов. Подобны случаи (11) и (12). В случае (1) максимум АЕ достигся также при малых уровнях энергий E_K и E_M , благодаря сравнительно длинному периоду больших отрицательных значений компоненты B_z . В случае (10) после первого максимума АЕ появляются еще несколько максимумов. Это, возможно, связано с тем, что в магнитосфере произошло значительное накопление энергии в результате весьма больших значений E_K и E_M и поддержания большого E_M на длинный период (больше суток).

Вариации индекса Dst отражают три фазы бури [4]: начальная (с первоначальным возрастанием Dst), главная (со спадом Dst к большим отрицательным значениям) и фаза восстановления. Dst реагирует на увеличение энергий E_K и E_M медленнее индекса АЕ и значительно позже достигает отрицательного максимума. Самые большие отрицательные значения индекса Dst достиг в случаях (5), (7) и (10) - Dst имеет постоянный спад в продолжении

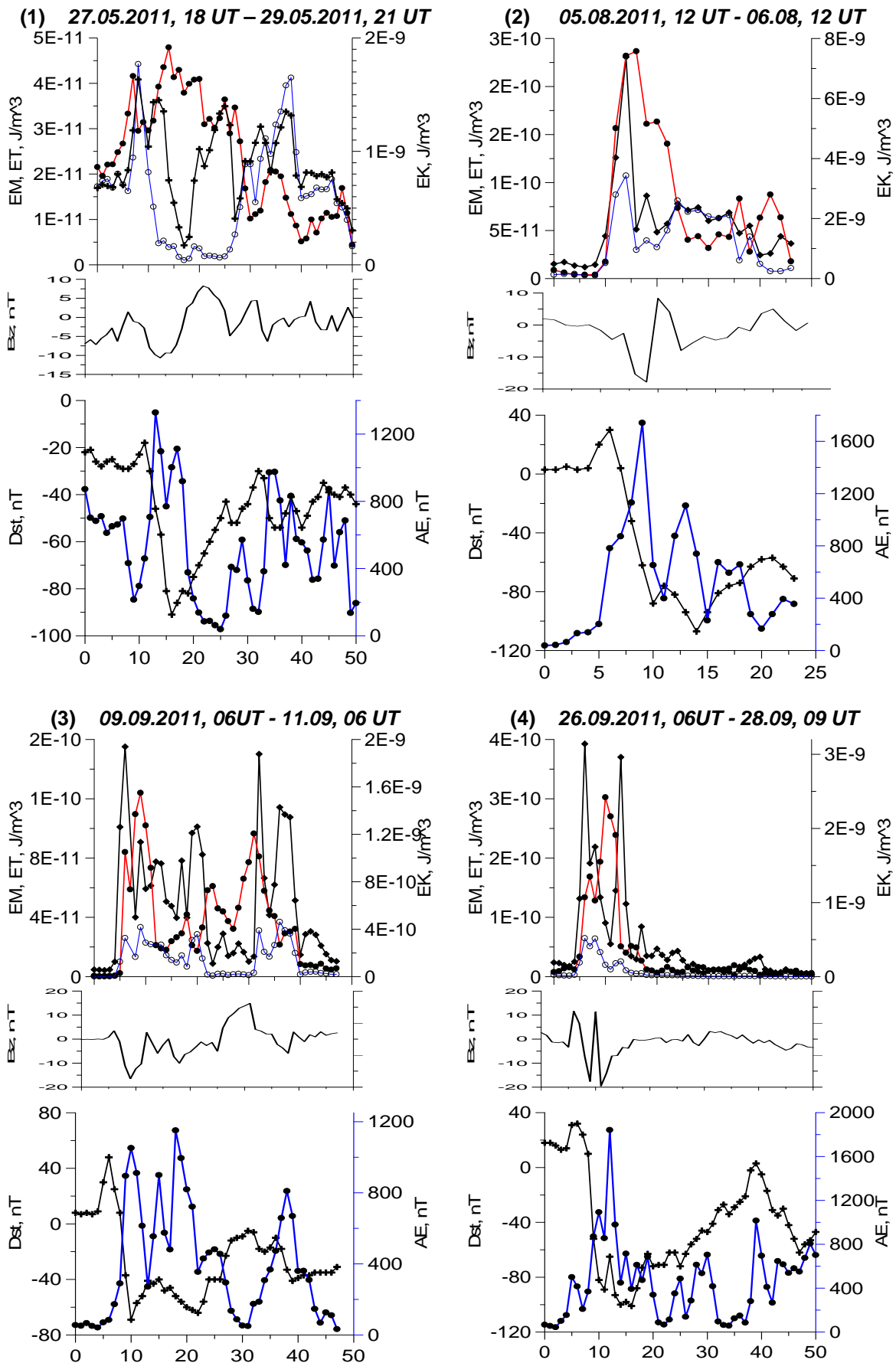


Рис. 1. Вариации во времени исследуемых величин для периодов (1)–(4). Для каждого периода на верхней панели показаны плотности энергий E_K (черная), E_M (красная) и E_T (синяя кривая); на средней панели - компонента B_z ММПГ; на нижней панели - индексы Dst (черная) и AE (синяя кривая).

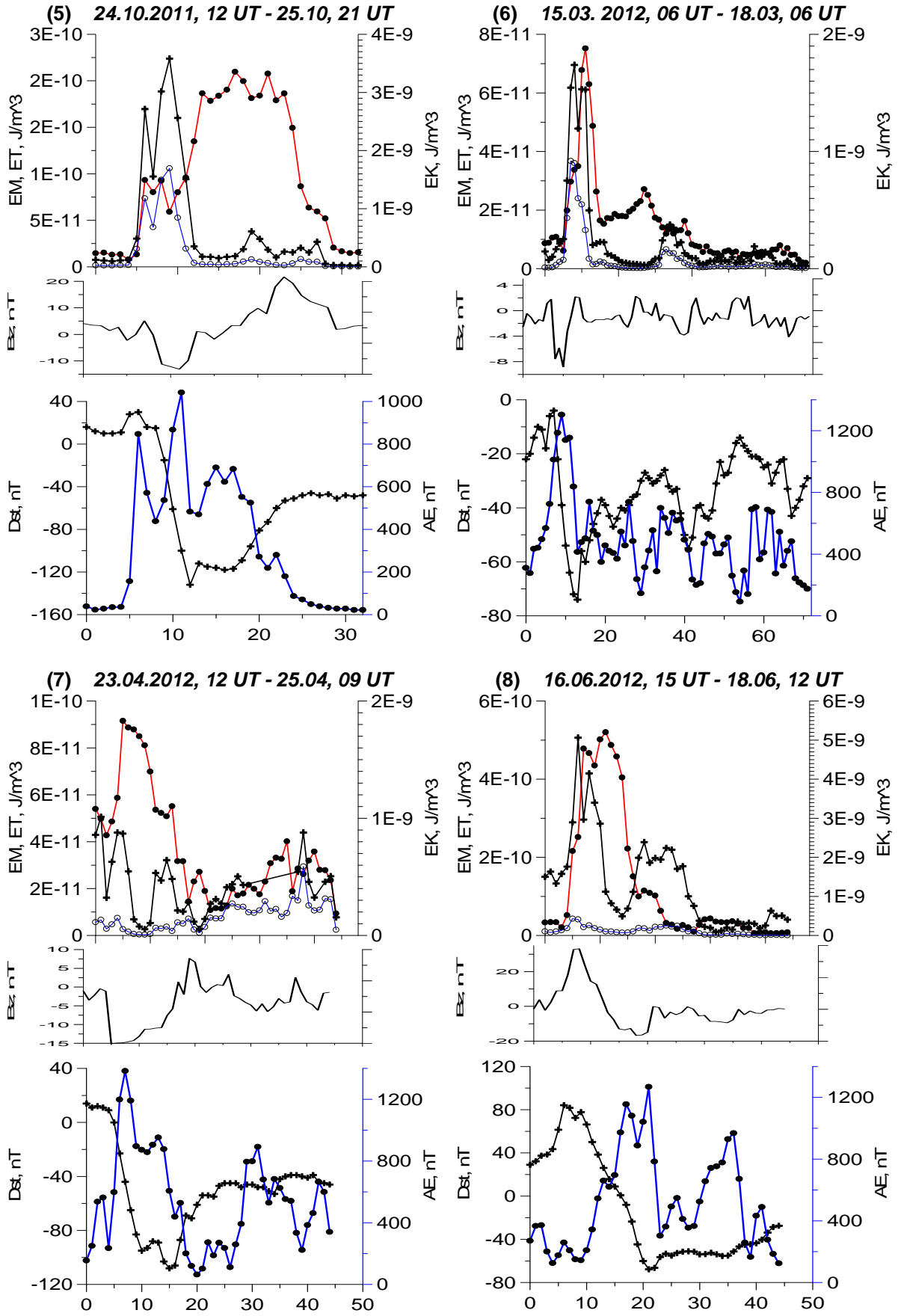


Рис. 2. То же, как на Рис.1, для периодов (5) – (8).

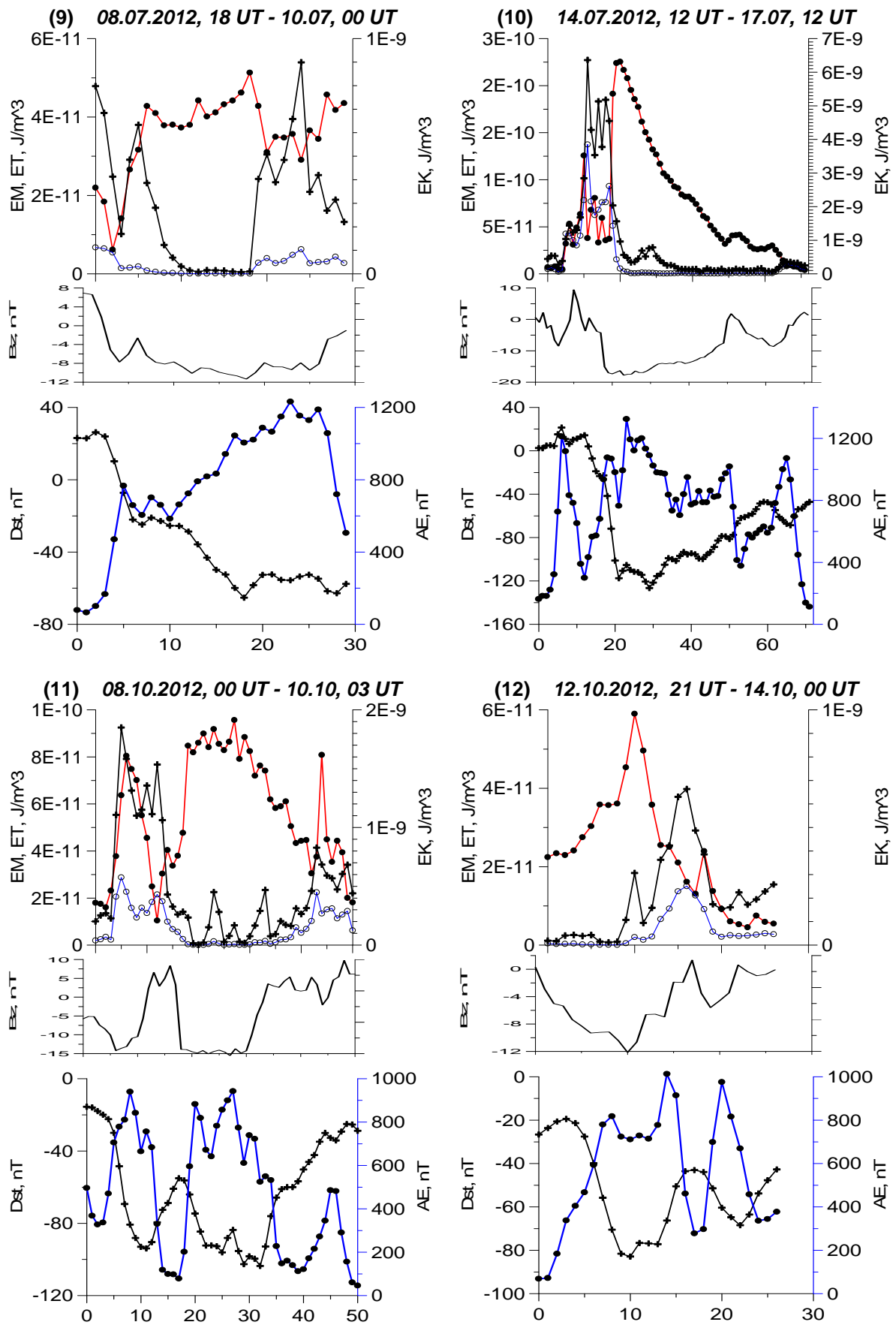


Рис. 3. То же, как на Рис.1, для периодов (9) – (12).

нескольких часов при больших значениях энергий E_K и E_M (в этих случаях E_K) и при больших отрицательных значениях компоненты B_z . Эти условия имеют место и в остальных случаях большого отрицательного тренда Dst, причем спад быстрее когда плотности энергий E_K и E_M и отрицательная B_z больше и на более длинный интервал времени, а также когда до начала спада Dst (в начальной фазе бури) его значение – отрицательное или малое положительное.

Условие большого отрицательного и долго задерживающегося значения компоненты B_z является ключевым. Это видно в случае (8): энергии E_K и E_M достигают одновременно очень больших значений ($E_K = 3 \times 10^{-9}$ - 5×10^{-9} нТ, $E_M = 5 \times 10^{-10}$ нТ, т.е. много больше, чем в остальных случаях) на нескольких часов, но на все это время компонента B_z остается большой положительной; при этом Dst на начальной фазе бури достигает большого максимума (~80 нТ). Тренд к отрицательным Dst начался только после того как компонента B_z стала большой отрицательной и за это время, при все еще значительных E_K и E_M , Dst изменилась от 80 нТ до -80 нТ. Таким образом, несмотря на большой спад, из-за большого положительного значения в начале спада, Dst достиг лишь умеренный отрицательный минимум. Подобная ситуация имеется в случаях (2), (3) и (4). Наоборот, в случаях (1), (9), (11) и (12) Dst достигает довольно большого отрицательного значения благодаря своего небольшого (или отрицательного) значения перед главной фазы и наличие длинных периодов большой отрицательной B_z , во время которых плотности энергий E_K и E_M были не очень большими, но все же значительны.

Закключение

Это исследование - наш первый шаг рассмотрения поведение солнечного ветра и межпланетного магнитного поля в пространстве Земли с точки зрения временных вариаций трех видов энергии – кинетическая, магнитная и термальная, по данным станции ACE в точке Лагранжа. Показано, что кинетическая энергия СВ обычно превосходит двух других энергий на один порядок и больше, а магнитная энергия обычно больше термальной, но бывают случаи выравнивания первых двух энергий. Сопоставление временных вариаций этих трех энергий солнечного ветра с реакцией магнитосферы в периодах геомагнитных бурь показывает, что перед повышением геомагнитной активности наблюдается значительный рост магнитной и кинетической энергий. Здесь рассмотрены индексы AE и Dst, характеризующие геомагнитную активность, соответственно, для авроральных и экваториальных широт. Первоначальное сопоставление временных вариаций трех энергий с этими индексами с учетом также вариации компоненты ММП B_z с изменениями индексов AE и Dst показывает, что AE реагирует быстро на возрастание кинетической и магнитной энергии, но только при больших отрицательных значениях B_z . Реакция Dst проявляется более инертным образом. Отрицательный максимум Dst достигается на главной фазе бури обычно несколько часов после реакции AE, и чем больше кинетическая и магнитная энергии, тем скорее переход Dst к большим отрицательным значениям. Ключевым фактором для достижения больших экстремальных значений индексов AE и Dst является направленность и величина B_z – большие пики AE и минимумы Dst достигаются лишь при сопутствующих больших отрицательных B_z .

Хотя для более глубокого и точного анализа ситуаций требуется привлечение и исследование дополнительных факторов и параметров, это исследование может быть полезным при поисках функциональных связей между вариациями параметров СВ – ММП и поведением геомагнитной активности в относительно длинных периодах времени (с учетом развития ситуации на многих часов). Это, возможно, дало бы возможность по данным космической станции в точке Лагранжа предсказывать поведение магнитосферы на период, который намного длиннее времени прихода событий СВ от этой точки до магнитосферы (одного часа). Это будет полезно при разработке методики прогнозирования космической погоды.

Литература:

1. S c h w e n n , R . Solar wind: global properties, Encyclopedia of astronomy and astrophysics, Nature Publishing Group, 2001.
2. M e y e r – V e r n e t , N. How does the solar wind blow? A simple kinetic model, Eur. J. Phys., Vol. 20 (1999) 167–176.
3. A s e n o v s k i , S ., Solar Wind Influences on the Different Interplanetary and Planetary Environments, "Solar influences on the magnetosphere, ionosphere and atmosphere" Sozopol, Bulgaria, 6-10 June 2011.
4. F e r n á n d e z d e C a m p r a , P. M. Z o s s i d e A r t i g a s. Comparison between indices during geomagnetic disturbances, Geofísica Internacional, Vol. 43, 2004, 1, 113-117.