

УДК 550.385:523.745

Т. П. Сумарук, П. В. Сумарук, Ю. П. Сумарук

Інститут геофізики ім. С. І. Субботіна Національної академії наук України, Київ e-mail: sumar@mail.lviv.ua

ГЕОМАГНІТНА АКТИВНІСТЬ ТА ЕНЕРГЕТИКА МАГНІТОСФЕРИ У 19–24-МУ ЦИКЛАХ СОНЯЧНОЇ АКТИВНОСТІ

Представлено результати зіставлення сонячної і геомагнітної активності та тісно пов'язану з ними енергетику магнітосфери в 19–23-му та на початку 24-го циклів сонячної активності. Оцінено кількість енергії, яка надійшла із сонячного вітру у магнітосферу за даними індексу $\Sigma(H - S_p)$. Показано зростання рекурентності геомагнітних збурень у мінімумах сонячної активності, що особливо добре проявилось на проміжку від листопада 2007 р. до січня 2009 р.

Останнім часом проблемам сонячно-земної фізики, зокрема проблемі глобальних змін клімату приділяється підвищена увага. Не підлягає сумніву, що клімат нашої планети залежить від Сонця і сонячної активності. Зокрема, зміна припливу енергії у магнітосферу Землі може призводити до аномальних змін клімату [1].

Дана робота присвячена аналізу змін енергії, що поступала із сонячного вітру у магнітосферу Землі за 19–24-й цикли сонячної активності.

Сонячна активність. Сонячна активність, як відомо, змінюється як циклічно, так і по фазі в циклі. Тривалість циклу визначається як час між двома послідовними мінімумами і становить: 11 років (цикл Швабе — Вольфа), 22 роки (цикл Хейла), 60–80, 100, 200, 360, 1000 років та інші [6].

Основними характеристиками, що описують сонячну активність, є числа Вольфа (характеризують кількість плям і їхніх груп), напруженість великомасштабного магнітного поля Сонця, парціальні індекси (ZE , ZO , SE), кут нахилу геліосферного струмового шару, індекс F_x (характеризує інтенсивність рентгенівських спалахів) та інші [8].

Розподіл плям по поверхні Сонця змінюється з фазою сонячного циклу. Після мінімуму активності новий цикл розпочинається появою груп плям на широтах $\pm 45^\circ$, з розвитком циклу

зона виходу нових плям дрейфує до екватора, при цьому середня широта плям зменшується із збільшенням їхнього числа. У максимумі активності середня широта складає $\pm 12^\circ$ з великим розкидом [8].

Магнітна полярність плям змінюється від циклу до циклу. В одному циклі головні плями мають одну і ту ж полярність в одній півкулі та протилежну — в іншій півкулі. У мінімумі циклу, як відомо, полярність плям змінюється, і деколи поряд з новими плямами зі зміненою полярністю на низьких широтах Сонця можна спостерігати плями, що залишились із попереднього циклу [7]. Таке явище спостерігалось на початку 24-го циклу. На рис. 1 приведено значення річних чисел Вольфа W з 1740 р. (дані з <http://www.wdcb.ru/stp/data/solar.act/sunspot/YEARLY>). Найбільш чітко виражені 11-річні цикли сонячної активності. Окрім того, у спектрі сонячної активності легко виділяються цикли з періодами 80–100 р., а також 200–210 і 350–360 р. Таку саму періодичність виділено у роботі [6] та у роботі [18] на основі аналізу ізотопів ^{14}C та ^{10}Be . Для 19–23-го циклів сонячної активності характерними були максимальні значення чисел Вольфа W (для 19-го циклу $W = 190.2$), а також мінімальні значення $W = 3.1$ для 24-го циклу, названого «малим Маундерівським мінімумом» [18]. Мінімум 24-го циклу був одним з найменших за останні 250 років, подібні мінімумами були

у 6-му та 15-му циклах, що пояснюється впливом вікового та двовікового циклу [6]. Пізніше ми розглянемо, як ці екстремуми вплинули на геомагнітну активність.

Характерною особливістю досліджуваних 11-річних циклів є порушення правила «парних — непарних пар» циклів Гнєвишева — Оля. Правило полягає в тому, що парні цикли за амплітудою змін чисел Вольфа більш слабкі, ніж наступні за ними непарні. За останні 250 років це правило порушувалось для циклів 4—5, 8—9, 22—23.

У табл. 1 для різних періодів P показано роки початку останнього циклу, роки максимуму та характер змін у циклі в даний час. Як бачимо, тільки 11-річний та 80-річний цикли перебувають у фазі росту активності, більш потужні 200-річний та 360-річний цикли перебувають на фазі спаду, що призведе до зменшення амплітуд 11-річних циклів.

Геомагнітна активність. Як відомо, є два канали передачі енергії від Сонця до Землі: електромагнітне та корпускулярне випромінювання [7]. Електромагнітне (видимий та інфрачервоний діапазон хвиль) — постійне випромінювання, та корпускулярне випромінювання — змінна частина енергії. І хоча змінна частина енергії, що надходить від Сонця, становить 0.001 постійної, все ж вона є основним джерелом магнітних процесів, що відбуваються на Землі, зокрема магнітних бур, суббур та ін. Передача енергії відбувається за допомогою сонячного вітру та міжпланетного магнітного поля (ММП).

Внаслідок наявності сонячних активних областей утворюються магнітогідродинамічні хвилі, корональні викиди маси, рекурентні корпускулярні потоки тощо. Всі ці явища беруть участь у формуванні короткохвильового випромінювання, збуреного сонячного вітру та ММП, котрі пізніше викликають появу магнітосферно-іоносферної системи струмів і геомагнітні збурення, що характеризують геомагнітну активність. Зрозумілим є те, що геомагнітна активність залежить від сонячної, а основною сполучною ланкою є сонячний вітер та вморожене в нього ММП. Параметри сонячного вітру змінюються в дуже широких межах і залежать від сонячної активності.

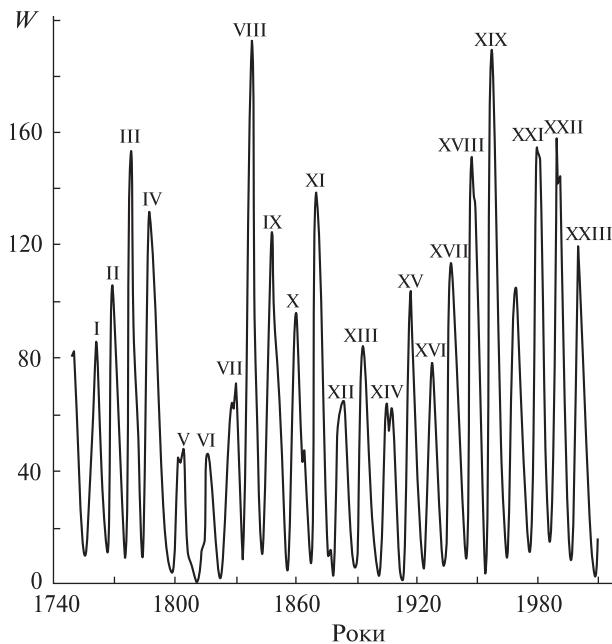


Рис. 1. Значення чисел Вольфа W у 1740—2010 рр.

Внаслідок взаємодії сонячного вітру із магнітосферою Землі в ній виникають системи струмів: авроральні електрострумені, струми на магнітопаузі, поздовжні струми, струми у хвості магнітосфери, система кільцевого магнітосферного струму і інші. Кожен з цих струмів найкраще відображається у варіації горизонтальної (північної складової магнітного поля Землі), що неперервно реєструється на магнітних обсерваторіях. Вклад кожного джерела у варіацію можна поррахувати за даними обсерваторій і залежить від попереднього стану середовища [11, 12].

За рівень відліку поля іррегулярних варіацій нами обрано спокійну сонячно-добову варіацію S_q . Основним джерелом S_q -варіацій є великомасштабні переміщення іонізованих газів в іоносфері, зумовлені сонячними припливами

Таблиця 1. Періоди сонячної активності та характер їхніх змін

P , роки	Рік початку	Рік максимуму	Характер змін
11	2009	2013	Ріст
80—100	1976	2020	Ріст
200—210	1850	1956	Спад
350—360	~1750	~1900	Спад

та розігріванням іоносфери хвильовою радіацією Сонця [5, 14—16]. Величина S_q змінюється від одного дня до іншого по амплітуді та фазі, а також із зміною сонячної та геомагнітної активності.

Окрім того, на S_q -варіацію впливають магнітосферні джерела та ММП. Зміна форми S_q -варіації може бути передвісником підсилення геомагнітної активності [2, 3]. Розділення S_q -варіації від різних джерел було зроблено в роботі [10], де показано зміну цієї величини з сезоном та у циклі сонячної активності.

Основні механізми передачі енергії від сонячного вітру у магнітосферу [4] такі: проникнення плазми через полярні каспи, прорив плазми через бокові поверхні магнітосфери, а також гідромагнітні механізми — в'язка взаємодія та замикання магнітних силових ліній на магнітопаузі.

У роботі [9] оцінено енергію сонячного вітру через полярні каспи, що розділяють магнітні силові лінії, котрі замикаються на денній стороні, та лінії, спрямовані у хвіст магнітосфери: вона становить $3 \cdot 10^{10}$ Дж/с. Такої енергії достатньо для виникнення магнітних суббур. Проникнення плазми сонячного вітру у магнітосферу через бокову поверхню може відбуватися як на вечірній, так і на вранішній стороні, якщо напруженість магнітного поля у перехідній зоні більша за напруженість поля всередині магнітосфери. При цьому плазма перехідної зони і магнітосфери перемішуються. Плазма, яка таким чином проникла у магнітосферу, пізніше переноситься у плазмовий шар унаслідок дрейфу, зумовленого градієнтом магнітного поля.

Енергетичний баланс магнітосфери можна зобразити у вигляді суми потужностей дисипаційних процесів, що відбуваються у магнітосфері, іоносфері та атмосфері Землі. Виділяють [13] такі процеси: джоульське нагрівання високоширотної іоносфери (потужність U_j), висипання заряджених частинок в овалі полярних сьайв (U_a), дисипація їх у кільцевий струм (U_{DR}) та у хвіст магнітосфери (U_T). Для розрахунку потужності U_j необхідні значення електричного поля та провідності іоносфери із супутникових вимірювань. Величину електричного поля та струм у високоширотній іоносфері можна визначити за

моделями, що пов'язують геомагнітні варіації з параметрами сонячного вітру.

Значення дисипації енергії в іоносфері оцінюють за напівемпіричними формулами, що пов'язують величини потоків частинок у зоні овалу полярних сьайв, вимірених супутниками, з AE -індексами (auroral electrojet) геомагнітної активності.

Так, енергію, витрачену на джоульське нагрівання іоносфери, можна оцінити за формулою [13]

$$U_j = 0.32AE \cdot 10^9, \quad (1)$$

енергію, витрачену на збільшення енергії авроральних частинок [13, 17] — за формулою

$$U_a = (1.75AE/100 + 1.6) \cdot 10^{10}, \quad (2)$$

(AE — в нанотеслах, а U_j і U_a — у ватах); величину дисипації енергії із кільцевого струму U_{DR} [13] — з виразу

$$U_{DR} = -0.74(dDR/dt + DR/\tau) \cdot 10^{10}, \quad (3)$$

де τ — стала розпаду кільцевого струму, яка змінюється залежно від фази магнітної бури.

Величину DR (disturbance radial) оцінюють як різницю між D_{st} та DCF :

$$DR = D_{st} - DCF = D_{st} - c\sqrt{n \cdot v^2}, \quad (4)$$

де n — концентрація частинок, v — швидкість сонячного вітру.

Розрахунок величини дисипації енергії у хвості магнітосфери (U_T) складний через те що просторово-часовий розподіл полів та струмів неможливо одержати. Тому величину U_T одержують за моделями струмів у хвості магнітосфери.

В усіх вищезгаданих дисипаційних процесах у магнітосфері витрачається енергія, яка надходить із сонячного вітру. Визначити її експериментально на кількісному рівні неможливо, тому припускають [9], що повна енергія, яка надходить із сонячного вітру у магнітосферу, дорівнює

$$U = U_j + U_a + U_{DR} + U_T. \quad (5)$$

Для дослідження величини енергії, що поступила у 19—24-му циклах сонячної активності, ми використали добову суму $\sum(H - S_q)$, де H — значення горизонтальної складової гео-

магнітного поля (за даними середньширотних геомагнітних обсерваторій «Львів», «Бельськ», «Київ»), S_q — значення цієї ж складової по п'яти міжнародно-спокійних днях. Суму беремо за місяць та знаходимо середнє значення за рік по всіх місяцях. Таким чином, було враховано всі збурення (а отже, і доплив енергії) та виключено варіації, пов'язані з динамо-струмами та із сезонними варіаціями.

Порівнявши добову суму $\Sigma(H - S_q)$ із іншими індексами геомагнітної активності AE , K_p , ми отримали високу кореляцію ($r = 0.8 - 0.9$) і запропонували використовувати його як індекс геомагнітної активності [19], що оперативно вираховується за даними середньширотної обсерваторії.

Замінивши у формулах (1), (2) індекс AE на добову суму $\Sigma(H - S_q)$ (приведену до середньгодинних значень), ми розрахували значення енергії, що поступила за 19–24-й цикли сонячної активності. Як бачимо з рис. 2, кількість енергії, що поступила із сонячного вітру у магнітосферу, має чітко виражену 11-річну циклічність (чітко прослідковується вплив 11-річних циклів сонячної активності). Максимуми енергії відповідають максимумам чисел Вольфа, чітко виражено вплив 80–100 річного циклу.

У табл. 2 представлено середньмісячні величини енергії, що поступала у магнітосферу у роки мінімумів (початки 19–24-го циклів), со-

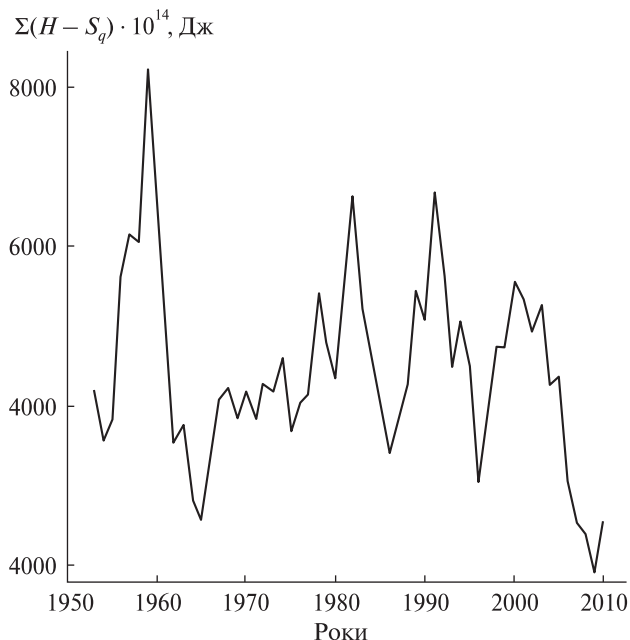


Рис. 2. Середньорічна кількість енергії, що поступила у магнітосферу із сонячного вітру за 19–24-й цикли сонячної активності

нячної та геомагнітної активності. Ця енергія прямо пропорційна кількості всіх геомагнітних збурень, що протікали в дані роки. Величина середньої за рік енергії, що поступала у мінімуми 19–24-го циклів, найменша у 2009 р., і у 1.5–2 рази менша за відповідні величини у всіх спостережуваних мінімумах. Це підтверджує дані ін-

Таблиця 2. Середньмісячне значення допливу енергії у мінімуми 19–24-го циклів, виражене у 10^{14} Дж

Місяці/роки	1955	1965	1975	1986	1996	2009
1	2529	1943	4259	4127	2665	1807.7
2	2974	2352	3441	3997	2592	2227.5
3	4638	2345	5426	3676	3352	2008
4	5158	3145	3555	2241	3814	1436.7
5	5027	2565	3133	3637	2514	1817.7
6	2421	3232	2818	2802	2358	2086.5
7	2581	2727	2925	3001	2636	2487.1
8	3070	2394	2591	3237	2649	1805
9	3623	2945	3021	3319	3792	1725.4
10	4057	2062	3945	3097	4115	2141.1
11	4876	2306	5518	5146	2755	1899.9
12	5011	2898	3486	2561	2843	1453.5
Середнє	3830	2576	3677	3403	3007	1908

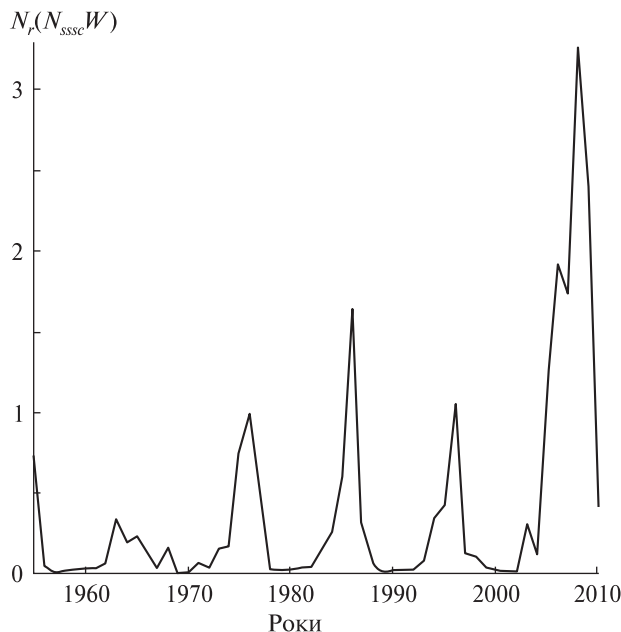


Рис. 3. Відносна кількість рекурентних геомагнітних збурень та кількості бур з раптовим початком, пронормована на величину чисел Вольфа

ших досліджень [18] про «малий маундерівський мінімум».

Характерною була і кількість рекурентних геомагнітних збурень для 19-го та 24-го циклів сонячної активності. Рекурентними вважались збурення, котрі повторювались два і більше разів у 27-денному циклі. Максимальна рекурентність спостерігалась для 2378—2395 обертів Сонця (по Бартельсу) з 23 листопада 2007 р. до 27 січня 2009 р. В цей час кількість спалахів на Сонці була надзвичайно низькою, хоча збурення магнітного поля Землі спостерігались. Рекурентні геомагнітні збурення повторювались у 17 обертах Сонця. Збурення виникали у 1—4-й дні та 16—20-й дні бартельського оберту. Очевидно, вони виникали внаслідок рекурентних довготривалих потоків сонячної плазми (наприклад корональних дір), що перебували на активних довготах Сонця.

На рис. 3 показано відношення кількості N_r рекурентних геомагнітних збурень до кількості N_{ssc} бур з раптовим початком. Для виключення впливу 11-річного сонячного циклу відношення N_r/N_{ssc} пронормовано на величину чисел Воль-

фа W за 19—24-й цикли сонячної активності. Як бачимо, свого максимуму відносна кількість рекурентних геомагнітних збурень набула у 2009 р. Відношення N_r/N_{ssc} є більшим у 1.5—4 рази за попередні мінімуми сонячної активності. В даному випадку прослідковується вплив 22-річного циклу сонячної активності.

Кількість бур з раптовим початком (SSC) прямо пропорційна числам Вольфа. Слід зазначити зростання у максимумах кількості бур з раптовим початком від циклу до циклу. Зменшення чисел Вольфа від 21-го до 24-го циклу привело до збільшення рекурентності збурень у мінімумах цих циклів. Очевидно, можна спрогнозувати відповідне збільшення кількості рекурентних збурень із зменшенням чисел Вольфа.

Поява у 2010—2011 рр. бур з раптовим початком (за даними геомагнітних обсерваторій) свідчить про те, що мінімум 24-го циклу закінчився, і ми наближаємось до максимуму сонячної активності та геомагнітної активності.

ВИСНОВКИ

Геомагнітна активність, а отже, і кількість енергії, що надходить у магнітосферу Землі, чітко залежить від сонячної активності. У досліджуваний період (19—24-й цикли сонячної активності) найменша кількість енергії поступала у магнітосферу у 2009 р. і була у 1.5—2 рази менша за мінімуми 19—23-го циклів.

Велика кількість рекурентних геомагнітних збурень спостерігалась у мінімумі 24-го циклу при малих значеннях чисел Вольфа. Відносна кількість рекурентних геомагнітних збурень набула максимальної величини у 2009 р. Значення відношення N_r/N_{ssc} є більшим у 1.5—4 рази, ніж значення за попередні мінімуми сонячної активності.

Зменшення річних чисел Вольфа від 21-го до 24-го циклу привело до збільшення рекурентних збурень у мінімумах цих циклів. Можна прогнозувати відповідне збільшення кількості рекурентних збурень зі зменшенням чисел Вольфа.

1. Авдюшин С. И., Данилов А. Д. Солнце, погода и климат: сегодняшний взгляд на проблему (обзор) // Геомагнетизм и аэронавигация. — 2000. — 40, № 5. — С. 3—14.

2. Афанасьева В. И. Корпускулярная природа изменчивости ото дня ко дню спокойных солнечно-суточных геомагнитных вариаций // Геомагнетизм и аэрономия. — 1961. — **1**, № 4. — С. 712–716.
3. Афанасьева В. И. Изменчивость ото дня ко дню спокойных солнечно-суточных вариаций и направление межпланетного магнитного поля // Геомагнетизм и аэрономия. — 1973. — **13**, № 1. — С. 175–178.
4. Ковалевский И. В. Энергетические аспекты солнечно-земных связей. — М: Наука, 1976. — 51 с.
5. Козаков В. В. Влияние регулярных магнитосферных токов на сезонную вариацию координат фокуса S_q -токовой системы // Ионосфера и солнечно-земные связи. — Алма-Ата, 1980. — С. 139–144.
6. Комитов Б. П., Кафтан В. И. Изменение солнечной активности последних тысячелетий. Возможен ли очередной долгопериодический солнечный минимум // Геомагнетизм и аэрономия. — 2003. — **43**, № 5. — С. 592–601.
7. Космическая геофизика. — М.: Мир, 1976. — 544 с.
8. Кременецкий И. О, Черемных О. К. Космічна погода. — Київ: Наук. думка, 2009. — 142 с.
9. Левитин А. Е. Взаимодействие солнечного ветра с магнитосферой // Изв. РАН. Сер. физ. — 2006. — **70**, № 10. — С. 1525–1533.
10. Сумарук Т. П., Сумарук Ю. П. Про джерела S_q -варіацій геомагнітного поля в середніх широтах // Геофиз. журн. — 2005. — **27**, № 2. — С. 299–303.
11. Сумарук Т. П., Сумарук Ю. П. До питання енергетики магнітосфери на різних рівнях сонячної та магнітної активності // Геофиз. журн. — 2006. — **28**, № 3. — С. 116–121.
12. Сумарук Ю. П. Залежність величини варіацій геомагнітного поля від початкового стану магнітосферно-іоносферної системи // Космічна наука і технологія. — 2011. — **17**, № 1. — С. 39–42.
13. Akasofu S. I. Energy coupling between solar wind and magnetosphere // Space Sci. Revs. — 1982. — **28**. — P. 121–190.
14. Butcher E. S., Brown G. M. Abnormal quiet days and effect of the IMF on the apparent position of the S_q -focus // Geophys. J. Roy. Astron. Soc. — 1980. — **63**, N 3. — P. 783–789.
15. Butcher E. S., Brown G. M. On the nature of the abnormal quiet days in $S_q(H)$ // Geophys. J. Roy. Astron. Soc. — 1980. — **64**, N 2. — P. 513–526.
16. Butcher E. S., Brown G. M. The variability of $S_q(H)$ on normal quiet days // Geophys. J. Roy. Astron. Soc. — 1981. — **64**, N 2. — P. 527–537.
17. Feldstein Y. I. Modeling of the magnetic field of magnetospheric ring current as a function of interplanetary medium parameters // Space Sci Revs. — 1992. — **59**. — P. 83–165.
18. Vaquero J. M., Gallego M. C., Usoskin I. G., Kovaltsov G. A. Revisited sunspot data: a new scenario for the onset of the maunder minimum // Astrophys. J. Lett. — 2011. — **731**: L24 (4pp), doi:10.1088/2041-8205/731/2/L24.
19. Sumaruk T., Sumaruk Yu. The New Index of Geomagnetic Activity // Pubs Inst. Geophys. Polish Acad. Sci. Monographic vol. — 2007. — **C-99** (398). — P. 374–379.

Надійшла до редакції 11.11.11

T. P. Sumaruk, P. V. Sumaruk, Yu. P. Sumaruk

GEOMAGNETIC ACTIVITY AND ENERGETICS OF THE MAGNETOSPHERE DURING THE 19–24th SOLAR ACTIVITY CYCLES

We present some results of our comparison of the solar and geomagnetic activities and the magnetosphere energetics closely connected to them from the 19th to 23th and at the beginning of the 24th solar activity cycles. The quantity of the solar wind energy transported into the magnetosphere is estimated with the use of $\Sigma(H - S_q)$ indices. Some increase of the geomagnetic disturbance recurrence at solar activity minimums is shown. The phenomenon was most pronounced from November 2007 till January 2009.