

ДИНАМИКА СОЛНЕЧНОЙ И ГЕОМАГНИТНОЙ АКТИВНОСТИ. II. ПЕРИОДИЧЕСКИЕ ВАРИАЦИИ СОЛНЕЧНОЙ И ГЕОМАГНИТНОЙ АКТИВНОСТИ

И. П. Безродных, Е. И. Морозова,
А. А. Петрукович, М. В. Кожухов

Рассматривается связь динамики геомагнитной активности с периодическими вариациями солнечной активности. В работе проведен анализ динамики суммарной годовой геомагнитной активности в цикле с динамикой полного числа солнечных пятен в цикле для 8 циклов солнечной активности (17 – 24 циклы). Параметры 24 цикла солнечной активности значительно отличаются от средних значений 17 – 23 циклов. Годовая динамика геомагнитной активности в цикле определяется годовым распределением основных структур солнечного ветра: высокоскоростных потоков солнечного ветра, потоков медленного ветра и корональных выбросов. Показана связь распределения мощности среди гармоник периодической структуры скорости солнечного ветра и геомагнитных индексов с изменением гелиошироты основных источников высокоскоростных потоков солнечного ветра в 2006 – 2010 гг. Проведен анализ сезонных вариаций геомагнитной активности на основе динамики Kp -индекса для 7 циклов солнечной активности (17 – 23 циклы). Рассмотрена статистика динамики сезонных вариаций геомагнитной активности для периода 1932 – 2014 гг.

Ключевые слова: циклы солнечной и геомагнитной активности, рекуррентная геомагнитная активность, сезонные вариации, корональные дыры.

Предлагаемый обзор «Динамика солнечной и геомагнитной активности», состоящий из трех частей, посвящен анализу современных представлений о связи геомагнитной активности с динамическими процессами в солнечной короне. Геомагнитная активность формируется как отклик магнитосферных процессов на изменение структуры потоков солнечного ветра, то есть фактически отражает изменения структуры солнечной короны в процессе развития солнечной активности. Наиболее значительные крупномасштабные вариации геомагнитной активности (магнитные бури или штормы) связаны с влиянием корональных выбросов и высокоскоростных потоков солнечного ветра. В первой части обзора «Источники геомагнитной активности, корональная масс-эжекция, высокоскоростные потоки солнечного ветра» [1] рассмотрены основные вопросы, связанные с влиянием на геомагнитную активность изменения структуры потоков солнечного ветра при воздействии корональных выбросов и высокоскоростных потоков солнечного ветра. Данная часть работы посвящена вопросам связи динамики геомагнитной активности с периодическими вариациями солнечной активности.

11-летние вариации (17 – 24 солнечных циклы)

Основными источниками, определяющими динамику геомагнитной активности, являются высокоскоростные потоки солнечного ветра (СВ) и корональные выбросы. Среднегодовая геомагнитная активность отражает суммарный эффект влияния отдельных структур СВ. Зависимость числа высокоскоростных потоков и корональных выбросов от фазы солнечного цикла (числа солнечных пятен или числа групп солнечных пятен – числа Вольфа)

фактически формирует среднегодовую динамику геомагнитной активности и соответственно динамику среднегодовых величин Kp -индекса. Рассмотрим динамику геомагнитной активности в связи с динамикой солнечных циклов. На рис. 1 представлены среднегодовые величины числа солнечных пятен (SSN) и среднегодовые среднесуточные значения Kp -индекса за период с 1932 по 2019 гг. (17 – 24 циклы). Далее в тексте везде используются среднегодовые среднесуточные величины Kp -индекса.

Циклы солнечной активности и геомагнитной активности по времени не совпадают. Минимум геомагнитной активности наблюдается в начале очередного цикла на фазе подъема (запаздывание ~1 год). Исключением является 24-й цикл активности Солнца, минимум геомагнитной активности приходится непосредственно на начало 24-го цикла. В течение трех лет в 2008 – 2010 гг. наблюдалась самая низкая за 80-летний период с 1932 г. геомагнитная активность. Максимум геомагнитной активности запаздывает относительно максимума солнечной активности на несколько лет. Для сравнения динамики Kp -индекса и числа солнечных пятен в цикле в табл. 1 для 8 циклов солнечной активности (17 – 24 циклы) показаны следующие величины: $\Sigma Kp_{\text{цикл}}$ – суммарная величина Kp -индекса в цикле; $\Sigma SSN_{\text{цикл}}$ – суммарное число солнечных пятен в цикле; $Kp_{\text{макс}}$ – максимальная величина Kp -индекса для каждого цикла, указан год для $Kp_{\text{макс}}$ и число солнечных пятен – SSN ($Kp_{\text{макс}}$); $SSN_{\text{макс}}$ – максимальное число солнечных пятен в цикле и указан год $SSN_{\text{макс}}$. В табл. 1 также указаны средние для 7 циклов (17 – 23 циклы) значения

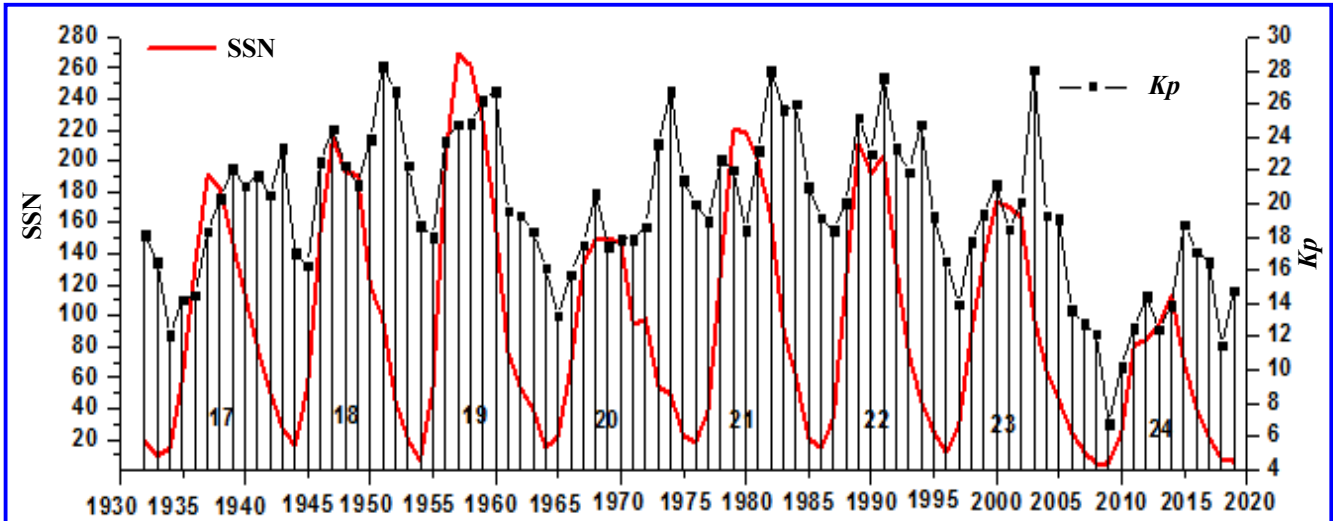


Рис. 1. Среднегодовые величины числа солнечных пятен (SSN) и среднегодовые среднесуточные значения Kp -индекса за период с 1932 по 2019 гг. (17 – 24 циклы)

Таблица 1

№ цикла	$\Sigma Kp_{\text{цикл}}$	$\Sigma SSN_{\text{цикл}}$	Год $SSN_{\text{макс}}$	$SSN_{\text{макс}}$	Год $Kp_{\text{макс}}$	$Kp_{\text{макс}}$	SSN ($Kp_{\text{макс}}$)
17	185 (-6%)	1015	1937	191	1943	20,6 (-13%)	27 (-76%)
18	201	1097	1947	215	1951	24,6 (+4%)	98
19	194	1355 (+23%)	1957	269 (+32%)	1960	23,4	159
20	207 (+5%)	1005 (-9%)	1968	150	1974	23,4	49
21	199	1157	1979	220	1982	24,4	162
22	195	1054	1989	211	1991	24	203 (+78%)
23	196	1013	2000	174 (-15%)	2003	24,5	99
среднее	197	1099		204		23,6	114
24	140 (-29%)	545 (-50%)	2014	113 (-45%)	2015	17 (-28%)	70 (-39%)

следующих величин: $\Sigma Kp_{\text{цикл}}$, $\Sigma SSN_{\text{цикл}}$, $SSN_{\text{макс}}$, $Kp_{\text{макс}}$, $SSN (Kp_{\text{макс}})$, также указаны максимальные отклонения – проценты от средних величин. Для 24 цикла указаны отклонения наблюдаемых величин от средних значений для 7 циклов.

Можно сделать следующие выводы. За 17 – 23 циклы $\Sigma SSN_{\text{цикл}}$ меняется в пределах +23/-9 % от среднего, $\Sigma Kp_{\text{цикл}}$ меняется в пределах +5/-6 % от среднего, суммарная геомагнитная активность изменяется независимо от изменения числа солнечных пятен. Максимальные значения $Kp_{\text{макс}}$ -индекса регистрируются на фазе спада солнечных циклов и почти не зависят от цикла солнечной активности. Для максимумов геомагнитной активности (1943 г., 1951 г., 1960 г., 1974 г., 1982 г., 1991 г. и 2003 г.) среднее значение $Kp_{\text{макс}} = 23,6$ (разброс величин ~ +4/-13 %). Максимальная в цикле геомагнитная активность не зависит от числа солнечных пятен ($SSN Kp_{\text{макс}}$) и от полного числа солнечных пятен в цикле ($\Sigma SSN_{\text{цикл}}$). Параметры 24 цикла солнечной

активности значительно отличаются от средних значений 17 – 23 циклов: на ~50% уменьшается суммарное число солнечных пятен ($\Sigma SSN_{\text{цикл}} = 545$), на ~30% уменьшается полная геомагнитная активность в цикле ($\Sigma Kp_{\text{цикл}} = 140$) и максимальная геомагнитная активность ($Kp_{\text{макс}} = 17$). В 24 цикле максимальная геомагнитная активность зарегистрирована через год после максимума солнечной активности. Следует отметить, что среднее за 7 циклов время запаздывания $Kp_{\text{макс}}$ составляет ~4 года. Возможные причины слабой геоэффективности 24 солнечного цикла рассмотрим в III части этого обзора.

Среднегодовые величины Kp -индекса формируются как суммарный эффект воздействия различных структур СВ. Годовые вариации среднесуточных величин Kp -индекса отражают годовые вариации основных наиболее мощных структур потоков СВ, высокоскоростных потоков СВ (HSS) и корональных выбросов (СМЕ). Сравним динамику среднегодовых величин Kp -индекса со структурой

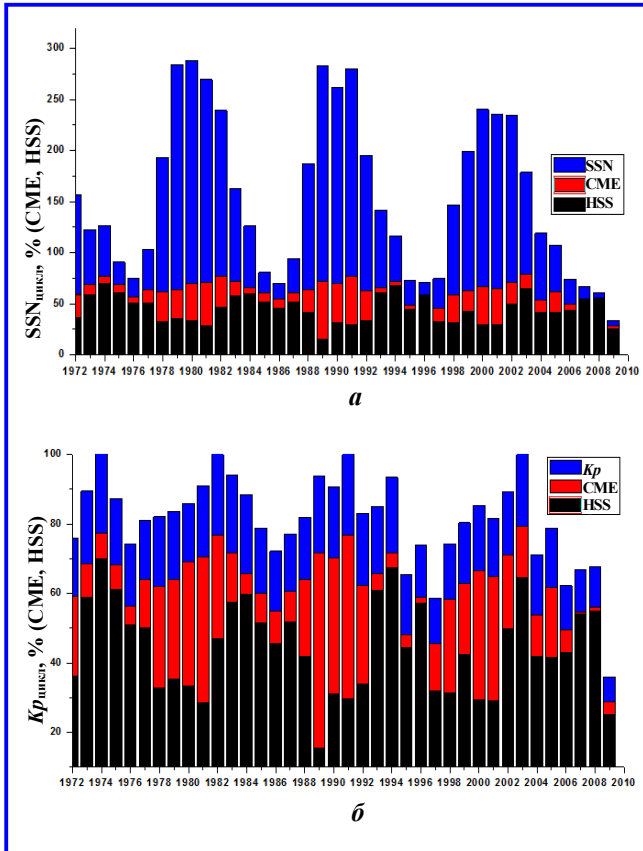


Рис. 2. Годовое распределение по времени высокоскоростных потоков СВ (%HSS), корональных выбросов (%CME): а – вариации среднегодовых величин числа солнечных пятен (SSN); б – годовые вариации среднесуточных величин Kp -индекса

потоков СВ для 1972 – 2009 гг. (21 – 23 солнечных циклы). Структура потока СВ задана как годовое распределение по времени выделенных структур СВ: высокоскоростных потоков СВ (%HSS), корональных выбросов (%CME) и потоков медленного ветра (%SSW). Данные о структуре потоков СВ взяты из работы [2]. Рассмотрим изменение структуры потоков СВ в солнечном цикле. На рис. 2, а в графическом виде в относительных единицах представлена динамика %HSS и %CME и среднегодовых величин солнечных пятен, на рис. 2, б динамика %HSS и %CME и среднегодовых величин Kp -индекса. В процессе развития солнечной активности меняется годовое распределение по времени высокоскоростных потоков и корональных выбросов.

На фазе роста солнечной активности процент времени для HSS уменьшается, достигая минимума вблизи максимума цикла, и далее на фазе спада постепенно увеличивается и достигает максимума спустя несколько лет (2 – 4 года) после максимума солнечной активности. На фазе роста процент вре-

мени для CME увеличивается, достигает максимума вблизи максимума солнечной активности и далее на фазе спада быстро уменьшается. Динамика Kp -индекса в основном повторяет динамику корональных выбросов, увеличение среднегодового числа CME приводит к увеличению среднегодовой величины Kp -индекса. В табл. 2 дано среднее распределение по времени высокоскоростных потоков (%HSS), потоков медленного ветра (%SSW) и корональных выбросов (%CME) для 20 – 23 циклов отдельно для периодов максимальной и минимальной солнечной активности и для периодов максимальной геомагнитной активности. Для сравнения эти величины приведены отдельно для 22 цикла.

Таблица 2

Период	%HSS	%SSW	%CME
Макс. акт. (1968 г., 1979 г., 1989 г., 2000 г.)	27,3	32,8	40
Мин. акт. (1976 г., 1986 г., 1996 г., 2008 г.)	52,1	43,5	4,38
Kp_{\max} (1974 г., 1982 г., 1991 г., 2003 г.)	52,8	22,4	24,7
22 цикл $_{\max}$ (1989 г.)	15,4	28,4	56,2
22 цикл $_{\min}$ (1996 г.)	45,4	45,1	9,5
22 цикл Kp_{\max} (1991 г.)	29,7	23,2	47,1

В годы максимума солнечной активности структуру потоков СВ формируют корональные выбросы, при этом суммарный вклад высокоскоростных потоков и медленного солнечного ветра составляет ~60%. В годы минимума солнечной активности и в годы максимальной геомагнитной активности вклад в структуру потока СВ корональных выбросов уменьшается, соответственно, до <5% и <25%, основной вклад >50% связан с высокоскоростными потоками. Следует отметить, что данные табл. 2 показывают среднюю для 4 циклов динамику структуры потоков СВ, но для отдельных циклов может регистрироваться значительное отличие динамики структуры потоков СВ от средней. Например, в 22 цикле максимальная геомагнитная активность (Kp_{\max}) зарегистрирована в 1991 г. на фазе спада солнечной активности, но при этом основной вклад в Kp_{\max} связан с влиянием CME (%CME/%HSS \approx 1,6 при средних значениях для этого периода \approx 0,47). В 1991 г. зарегистрировано самое большое число корональных выбросов (~40), сопровождавшихся магнитными бурями с $Kp \geq 7$.

В процессе развития солнечной активности меняется соотношение между числом магнитных бурь, вызванных СМЕ, и рекуррентными потоками, что связано с изменением соотношения между числом корональных выбросов СМЕ и числом рекуррентных высокоскоростных потоков. На рис. 3, а приведено сопоставление динамики солнечных пятен R с динамикой числа СМЕ (СМЕ/день) для периода 1996 – 2010 гг. [3]. Различные периоды солнечной активности промаркированы значками разных цветов. Данные усреднены за период 27 суток. На рис. 3, б показана зависимость числа СМЕ/день от числа солнечных пятен для полного цикла активности. На рис. 3, в для улучшения статистики величины СМЕ/день сгруппированы по числу солнечных пятен (данные усреднены за 14 солнечных оборотов).

В среднем динамика числа СМЕ отражает общую структуру динамики числа солнечных пятен в солнечном цикле. Для геомагнитной активности это проявляется как увеличение числа СМЕ на фазе роста активности (увеличивается число солнечных пятен) и уменьшение вклада СМЕ в геомагнитную активность при спаде солнечной активности. Следует отметить, что даже при нулевом числе солнечных пятен число СМЕ \sim равно 0,5 СМЕ/день. В течение всего цикла для всех величин солнечных пятен R регистрируются значительные отклонения числа СМЕ/день от средних значений (часто в несколько раз). Это означает, что общая структура геомагнитной активности фактически формируется как случайный процесс и геомагнитная активность не зависит от числа солнечных пятен (см. табл. 1).

Kp -индекс используется как мера геомагнитной активности и в относительных единицах определяет мощность магнитосферных бурь (магнитосферные бури G1, $Kp = 5$, G2, $Kp = 6$, G3, $Kp = 7$, G4, $Kp = 8$, G5, $Kp > 8$). Рассмотрим связь распределения магнитосферных бурь (для выделенных величин Kp -индекса) с динамикой структуры потока СВ. На рис. 4 для четырех солнечных циклов (20 – 23 циклы) показана динамика среднегодового числа магнитосферных бурь типа G1 ($Kp \sim 5$ – small), G2 ($Kp \sim 6$ – medium) и $\geq G3$ ($Kp \geq 7$ – large + major), вызванных корональными выбросами и высокоскоростными потоками (Corotating Streams) [4].

На фазе спада и вблизи минимума солнечной активности в основном регистрируются магнитосферные бури типа G1 и G2, вызванные рекуррентными высокоскоростными потоками СВ. На фазе роста солнечного цикла и вблизи максимума активности возрастает число магнитосферных бурь типа G2, вызванных корональными выбросами. Магнитосферные бури типа $\geq G3$ наблюдаются на фазе роста и вблизи максимума активности и в основном связаны с корональными выбросами.

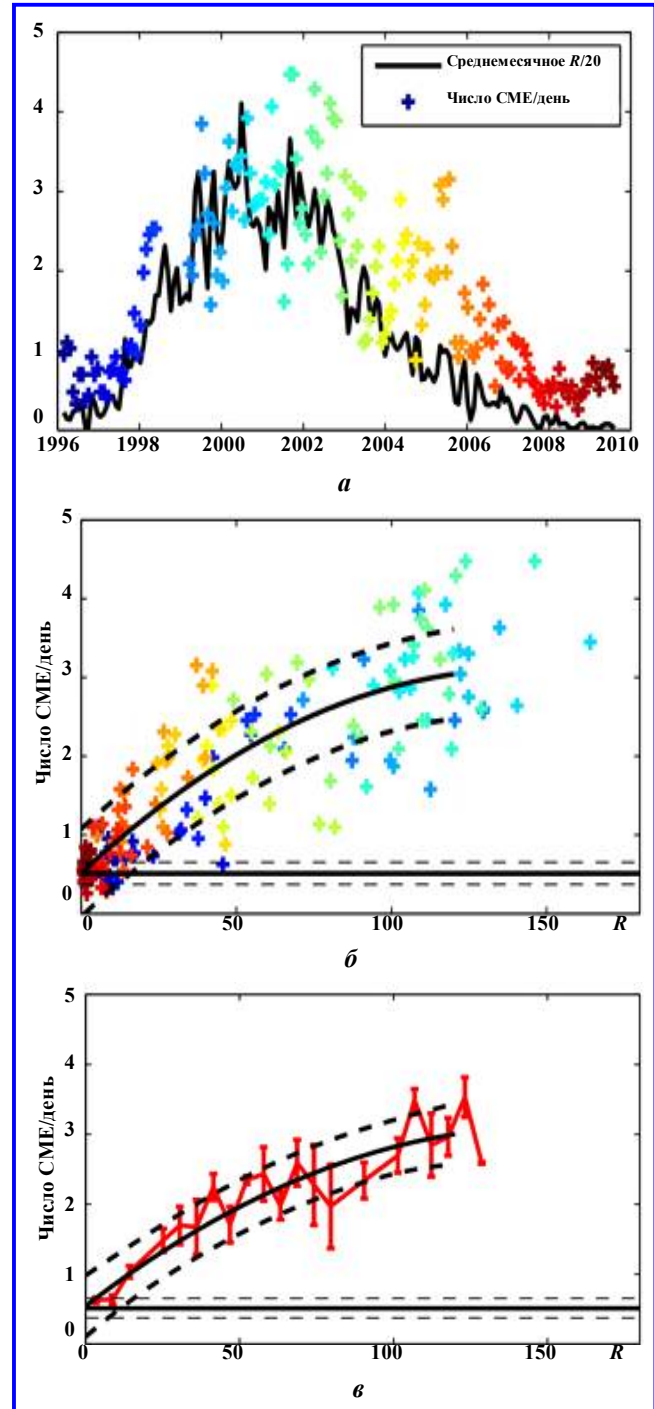


Рис. 3. Вариации числа солнечных пятен R и высокоскоростных потоков: а – для периода 1996 – 2010 гг. [3] (данные усреднены за период 27 суток); б – зависимость числа СМЕ/день от числа солнечных пятен для полного цикла активности; в – зависимость сгруппированных по числу солнечных пятен величин СМЕ/день от числа солнечных пятен (данные усреднены за 14 солнечных оборотов). Сплошная (пунктирная) черная линия на б и в – аппроксимация результатов (разброс точек при ошибке ± 1 сигма). При нулевом числе солнечных пятен число СМЕ \sim равно 0,5 СМЕ/день (сплошная прямая линия на в)

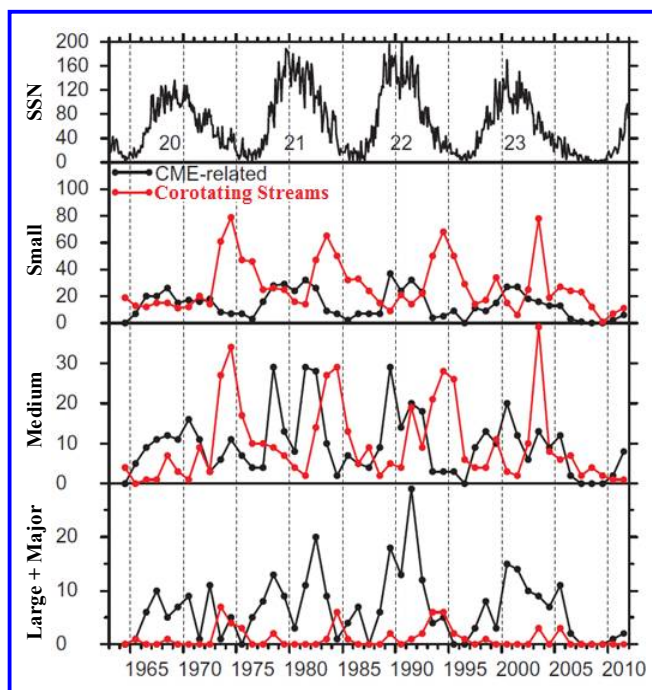


Рис. 4. Динамика среднегодового числа магнитосферных бурь типа G1 ($Kp \sim 5$ – small), G2 ($Kp \sim 6$ – medium), G3 ($Kp \geq 7$ – large + major) и более, вызванных корональными выбросами и высокоскоростными рекуррентными потоками. Период 1965 – 2010 гг.

В табл. 3 представлены средние по четырем солнечным циклам (период 1964 – 2010 г., 20 – 23 цикла) для фазы минимума солнечной активности и фазы максимума распределение числа магнитосферных бурь (G1 – G5), вызванных рекуррентными потоками и корональными выбросами. Данные приведены в процентах к полному числу магнитосферных бурь данного типа [4]. Для периодов минимумов взяты годы, когда число солнечных пятен было $\sim \leq 40$, это следующие периоды 1964 – 1966 гг., 1973 – 1977 гг., 1984 – 1987 гг., 1993 – 1997 гг., 2004 – 2010 гг. (minSA). В качестве

фазы максимума (maxSA) рассматриваются все периоды между минимумами. В графическом виде данные табл. 3 представлены на рис. 5. Распределение магнитных бурь выделенной мощности (по величине Kp -индекса) от разных источников (HSS и CME) зависит от фазы солнечного цикла.

Для обеих фаз солнечного цикла с увеличением Kp -индекса (мощности бури) регистрируется увеличение относительного вклада CME-бурь (1, 4) и уменьшение вклада HSS-бурь (2, 3). На фазе спада солнечной активности основное число магнитных бурь типа G1 и G2 связаны с HSS, магнитные бури мощностью $\geq G3$ вызваны CME.

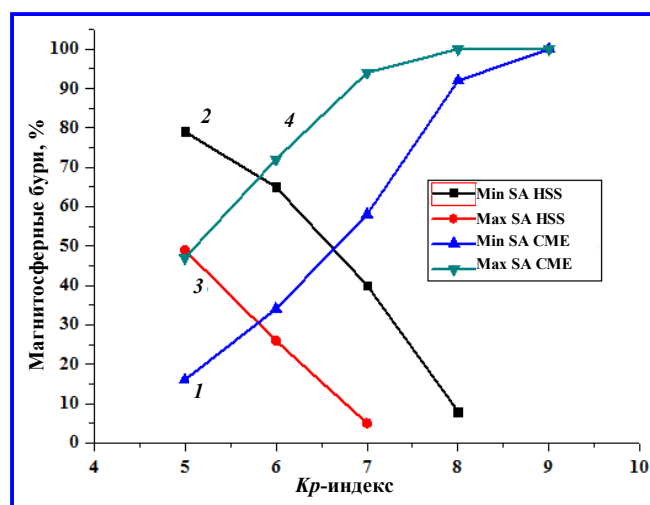


Рис. 5. Зависимость для минимумов (minSA) и максимумов (maxSA) солнечной активности (20 – 23 цикла) среднего распределения числа магнитосферных бурь, вызванных рекуррентными потоками и корональными выбросами, от величины Kp -индекса. Данные даны в % к полному числу магнитосферных бурь данного типа. Обозначение: 1 – число CME-бурь для minSA; 2 – число HSS-бурь для minSA; 3 – число HSS-бурь для maxSA; 4 – число CME-бурь для maxSA

Таблица 3

Период	Тип магнитной бури	Магнитные бури 1964 – 2011 гг.	Магнитные бури с корональными выбросами, %	Магнитные бури с рекуррентными потоками, %
Фаза минимума	G1	733	16	79
	G2	234	34	65
	G3	89	58	40
	G4	25	92	8
	G5	1	100	0
		$\Sigma 1082$		
Фаза максимума	G1	868	47	49
	G2	390	72	26
	G3	156	94	5
	G4	75	100	0
	G5	11	100	0
		$\Sigma 1500$		

На фазе роста активности 49% магнитных бурь типа G1 связаны с HSS, магнитные бури $\geq G2$ вызваны CME. Почти 100% магнитных бурь мощностью $\geq G4$ вызваны корональными выбросами (CME). Как было показано, суммарная геомагнитная активность слабо меняется от цикла к циклу и не зависит от полного числа солнечных пятен в цикле. Это определяется тем, что слабые магнитные возмущения с $Kp \leq 5$ составляют основную массу геомагнитных бурь и их количество почти не меняется.

Годовое распределение высокоскоростных потоков СВ и корональных выбросов – основных источников геомагнитных бурь $Kp > 5$, не постоянно, меняется от года к году и от цикла к циклу. Нет прямой связи между «размером» солнечного цикла (по числу солнечных пятен в максимуме) и типом распределения HSS и CME, это определяет нерегулярный характер распределения магнитных бурь между циклами солнечной активности. На рис. 6 представлено распределение числа магнитных бурь от G1 до G5 для 7 солнечных циклов (17 – 23 циклы), для сравнения в верхней части рисунка показана динамика числа солнечных пятен [4].

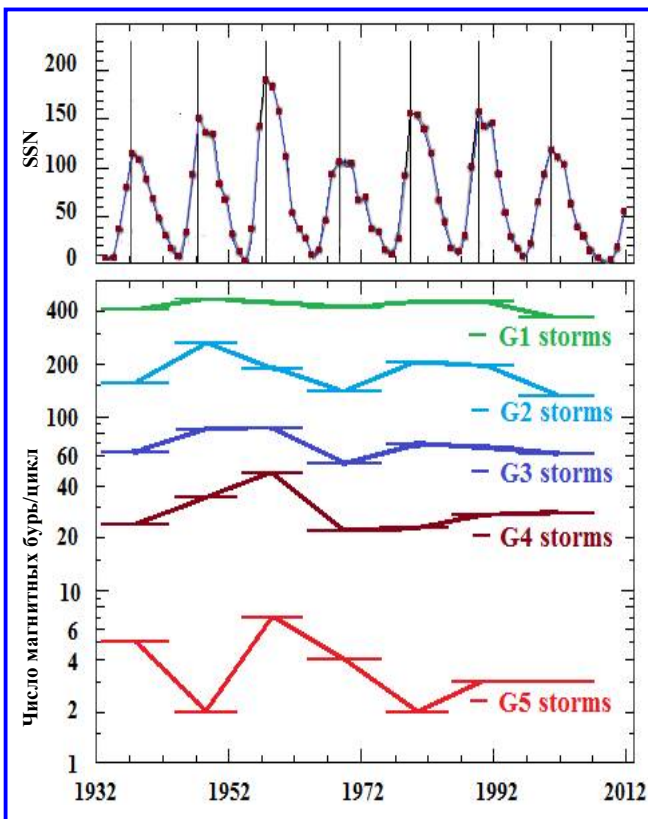


Рис. 6. Распределение числа магнитных бурь от G1 до G5 для 7 солнечных циклов (17 – 23 циклы)

Для магнитных бурь $>G1$ наблюдаются значительные вариации от цикла к циклу. Следует отметить некоторое подобие динамики числа магнитных бурь типа G3 и G4 и «размеров» солнечных циклов. В 23 цикле солнечной активности зарегистрировано самое низкое (за 80 лет) число магнитных бурь типа G1 и G2, что связано с чрезвычайно низкой солнечной активностью в 2008 – 2010 гг. и почти полным отсутствием высокоскоростных потоков.

Рекуррентные вариации геомагнитной активности

При анализе вариаций геомагнитной активности обычно рассматриваются несколько факторов, определяющих эффективность передачи энергии от СВ к магнитосфере: гелиоширота Земли, гелиоширота основных управляющих структур СВ и их динамика, знак магнитного поля Солнца. Геомагнитная активность отражает суммарный эффект влияния различных источников (корональные выбросы, высокоскоростные потоки СВ, потоки медленного ветра). Корональные выбросы связаны с возникновением активных областей и вспышечной активностью. Это случайные (Transient) процессы. Корональные дыры (основной источник высокоскоростных потоков СВ), существующие несколько оборотов Солнца, определяют основную внутригодовую и межгодовую периодическую динамику геомагнитной активности (в основном на фазе спада солнечной активности). Долготно-широтное распределение на Солнце корональных дыр и гелиоширота Земли проявляются в рекуррентной геомагнитной активности, в частности в динамике геомагнитных индексов. На рис. 7 в качестве примера стабильной рекуррентности приведен временной профиль скорости СВ для 9 солнечных оборотов (первая половина 2008 г.) [5].

В это время достаточно четко проявляются 2 – 3 источника высокоскоростных потоков (три низкоширотных корональных дыры), определяющих 2 – 3-потокую структуру СВ. Это проявляется как ~ 9-, 13,5- и 27-суточная периодичность скорости СВ. Для этого периода на рис. 8 показаны вариации Kp -индекса для четырех бартелевских 27-дневных оборотов Солнца с января (16.01.2008) по апрель (06.04.2008) 2008 г. Вариации Kp -индекса также показывают ~ 9-, 13,5- и 27-суточную периодичность.

Связь динамики магнитосферных параметров с динамикой корональных дыр для минимума 23 цикла (2006 – 2010 гг.) рассматривается в работе [6]. На рис. 9 показана динамика скорости СВ и Kp -индекса геомагнитной активности для 2006 – 2010 гг.



Рис. 7. Периодические изменения скорости солнечного ветра для девяти 27-суточных солнечных оборотов (выделены красными вертикальными линиями) [5]. Красным отмечены соответствующие номера каррингтоновых оборотов. На графике начало оборота сдвинуто на 4 дня – время распространения солнечного ветра до Земли. Ось абсцисс – дни 2008 г. (цена деления ~ 3,6 дня), ось ординат – скорость СВ, км/с

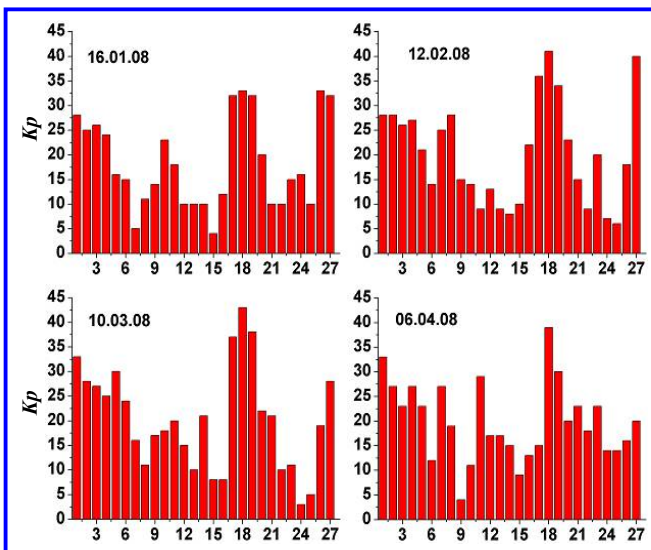


Рис. 8. Динамика K_p -индекса для четырех последовательных 27-суточных бартелевских периодов: начало 16.01.2008, 12.02.2008, 10.03.2008 и 06.04.2008

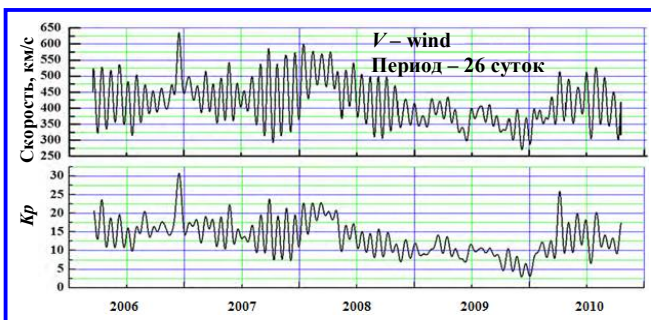


Рис. 9. Динамика скорости солнечного ветра и K_p -индекса геомагнитной активности на геостационарной орбите 2006 – 2010 гг.

Флуктуации с периодом меньше 20 дней из временных рядов были удалены. На рисунке четко выделяется основной ~26-дневный период вариаций для временных рядов скорости и K_p -индекса. Следует отметить близкое подобие общей динамики скорости СВ и K_p -индекса.

Синодический (вблизи Земли) период вращения Солнца (~27 дней на гелиошироте 25°) определяет доминирующую периодичность параметров СВ и соответственно периодичность отклика магнитосферных параметров. Вблизи Земли могут наблюдаться вариации параметров СВ с периодом от 25 до 29 дней [7]. Это связано с зависимостью от гелиошироты сидерического периода вращения Солнца (меняется от 24 дней на экваторе до 30 дней вблизи полюсов). В процессе развития и спада солнечной активности происходит структурная перестройка солнечной короны, меняется долготно-широтное распределение источников открытых магнитных полей на Солнце (корональных дыр). Стабильное состояние солнечной короны проявляется в формировании длительной рекуррентной активности. В качестве примера влияния продолжительных (9 оборотов Солнца) рекуррентных HSS на рис. 10 приведена динамика среднесуточных величин K_p -индекса для четырех солнечных оборотов с февраля по сентябрь 2006 г. Рекуррентная геомагнитная активность в первой половине 2006 г. определяется влиянием долгоживущих (~10 солнечных оборотов) среднеширотных корональных дыр, обычно появляющихся на месте старых активных областей на спадающей ветви цикла.

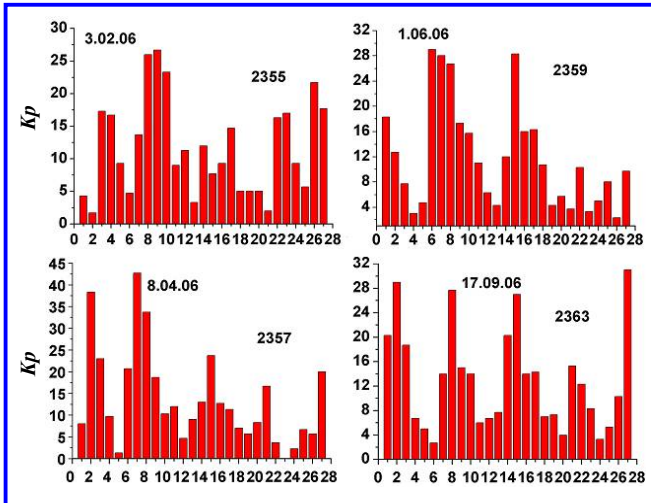


Рис. 10. Динамика K_p -индекса для четырех бартелевских периодов: № 2355 (начало 03.02.2006), № 2357 (начало 08.04.2006), № 2359 (начало 01.06.2006), № 2363 (начало 17.09.2006)

Вариации гелиошироты источника проявляются как изменение периодической структуры потоков солнечного ветра и соответственно проявляются в вариациях геомагнитных индексов. Анализ влияния долготно-широтной динамики корональных дыр на распределение мощности среди гармоник периодической структуры скорости СВ и геомагнитных индексов проведен в работе [6]. На рис. 11 приведены расчетные значения спектральной плотности мощности флуктуаций для временных рядов скорости СВ и K_p -индекса для 2007 – 2010 гг.

Отметим, что на рисунках спектры мощности даны в относительных единицах (нормированная мощность). Нормировки для всех параметров разные, но для каждого параметра постоянны и не меняются в течение 2007 – 2010 гг. Основными источниками высокоскоростных потоков СВ в течение ~2,0 лет с середины 2006 г. до середины 2008 г. были две очень крупные достаточно стабильные низкоширотные корональные дыры, разделенные ~ на 180° по гелиошироте. Максимальная спектральная плотность мощности в 2007 г. (рис. 11) регистрируется для периодов ~ 14 и 26 суток. С середины 2008 г. наблюдается значительная перестройка солнечной короны. К концу 2008 г. две низкоширотных корональных дыры значительно уменьшались, и в середине 2008 г. появляется новый источник – корональная дыра в южной полусфере на более высоких широтах. Такая перестройка структуры солнечной короны приводит к изменению периодической структуры потоков СВ, скорости СВ и K_p -индекса: уменьшается спектральная плотность мощности для 26-суточной гармоник, и значительно увеличивается мощность 13- и 9-суточных гармоник (рис. 11).

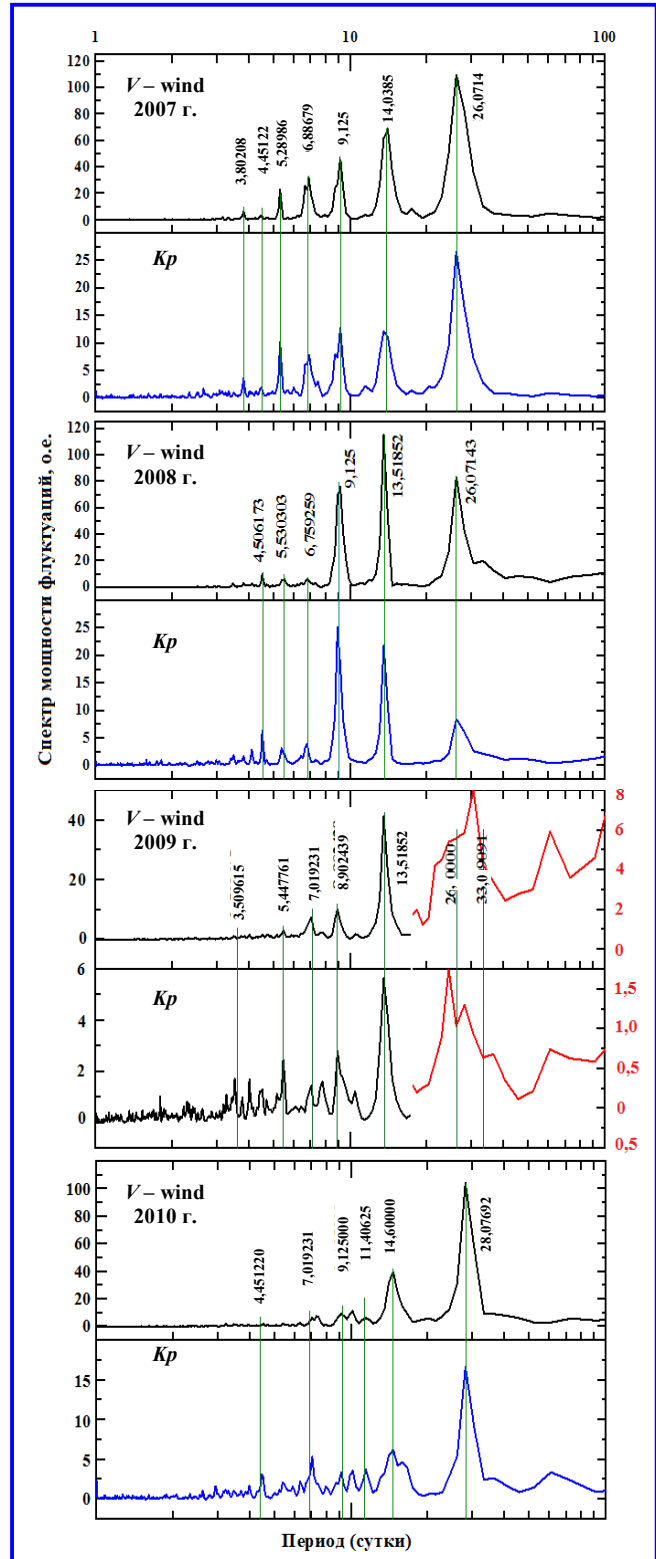


Рис. 11. Спектры мощности флуктуаций скорости солнечного ветра и K_p -индекса геомагнитной активности на геостационарной орбите для 2007 – 2010 гг. Для выделения гармоник с периодами более 20 суток для 2009 г. на панелях скорости ветра и K_p -индекса дополнительно показаны спектры мощности (красным) в новом масштабе (шкалы справа)

В 2009 г. происходит полная перестройка структуры солнечной короны: низко- и среднеширотные корональные дыры почти исчезают. Флуктуации с периодом 26 суток практически не проявляются (мощность уменьшается \sim в 15 раз по сравнению мощностью для 2008 г., рис. 11). Появление в периодической структуре кроме основного очень слабого 26-суточного периода 30-суточной гармоники отражает влияние полярной корональной дыры, возникновение которой связано с началом нового 24 цикла солнечной активности. В 2010 г. в связи с ростом солнечной активности продолжается перестройка структуры солнечной короны, появляется несколько активных областей на средних широтах, в межпланетном пространстве увеличивается число корональных выбросов массы. Источники СВ смещаются к средним широтам. Это проявляется в смещении периода основной гармоники к 28 суткам (рис. 11). Для 26-суточной гармоники коэффициент корреляции между спектральной мощностью скорости СВ и спектральной мощностью Kp -индекса равен $\sim 0,8$, для 14-суточной гармоники равен $\sim 0,95$ (результаты для 2006 – 2010 гг.).

Сезонные вариации геомагнитной активности

Годовая динамика ориентации магнитного диполя Земли относительно гелиосферной топологии приводит к появлению полугодовых (сезонных) вариаций геомагнитной активности. Первая публикация о превышении почти в два раза (в среднем) числа магнитных бурь весной (в периоды равноденствия – Equinox) по сравнению с осенью (в периоды солнцестояния – Solstice) была 150 лет назад в 1856 г. В настоящее время накоплен огромный экспериментальный материал по динамике геомагнитной активности, при исследовании сезонных вариаций обычно рассматривается динамика индексов геомагнитной активности (aa -, Ap -, am -, Dst -, Kp -индексов). Три гипотезы предложены для объяснения сезонных вариаций: аксиальная (Axial) гипотеза рассматривает сезонные вариации в связи с изменением гелиошироты Земли [8]; гипотеза равноденствия (Equinoctial) связывает сезонные вариации с вариациями угла между направлением потока СВ и осью магнитного диполя Земли [9]; эффект Russell-McPherron (R-M эффект) связывает сезонные вариации с вариациями угла между геоцентрической солнечной геомагнитосферной экваториальной плоскостью и солнечной экваториальной плоскостью [10]. Сезонные вариации рассматриваются как следствие изменения геометрии системы (они всегда должны возникать). Но при изменении углов изменяется состояние магнитосфе-

ры, могут меняться размеры и форма магнитопаузы, структура магнитосферных токов, динамика кольцевого тока, внутри магнитосферные процессы искажают геометрическую картину сезонных вариаций. Ни одна из предложенных гипотез, ни их комбинация не могут полностью объяснить экспериментальные данные по динамике геомагнитных индексов. Исследование динамики am -индекса (аналог aa -индекса) за 130-летний период показало, что $\sim 75\%$ сезонных вариаций может быть связано с вариациями угла между направлением потока СВ и осью магнитного диполя Земли (гипотеза равноденствия) [11, 12]. Связь сезонных вариаций с вариациями параметров СВ (магнитным полем и скоростью) рассмотрена в работе [13]. В среднем для периода 1963 – 2003 гг. только $\sim 50\%$ сезонных вариаций ap -индекса можно объяснить гипотезой равноденствия, остальные вариации связаны с изменениями параметров СВ. В работе [14] рассматривается влияние полярности межпланетного магнитного поля на динамику геомагнитных данных (Dst - и AE -индексы) для периода 1968 – 2010 гг. (1270 магнитных бурь). Максимальная геомагнитная активность наблюдается в периоды, близкие к осеннему равноденствию (Fall Equinox), когда межпланетное магнитное поле направлено от Солнца; когда поле направлено к Солнцу, максимальная геомагнитная активность наблюдается вблизи весеннего равноденствия (Spring Equinox). Авторы считают, что по сравнению с другими теориями эффект R-M наиболее четко объясняет эти экспериментальные результаты. В работе [15] рассмотрены сезонные вариации геомагнитной активности в связи с динамикой Dst -индекса. Анализ показал, что эффект R-M дает $\sim 50\%$ вклада в сезонные вариации, и $\sim 20\%$ вариаций связаны с гелиографической широтой Земли. При анализе большего объема данных сезонные вариации дают некоторую усредненную картину вариаций весна – осень, они наблюдаются при разных уровнях геомагнитной активности и для суббурь, и для всего диапазона магнитных бурь. На рис. 12 для 23 цикла солнечной активности показано среднемесячное распределение числа суббурь (~ 9000), их длительности и амплитуды [16].

В периоды весеннего и осеннего равноденствия (Equinox) число суббурь и их амплитуды близки к максимальным величинам, амплитуда модуляции весна – лето $\sim 35\%$, в периоды летнего солнцестояния (Solstice) число суббурь и их амплитуда минимальны, а длительность максимальна. Анализ показал зависимость распределения числа суббурь от фазы солнечного цикла (от типа источника возмущения)

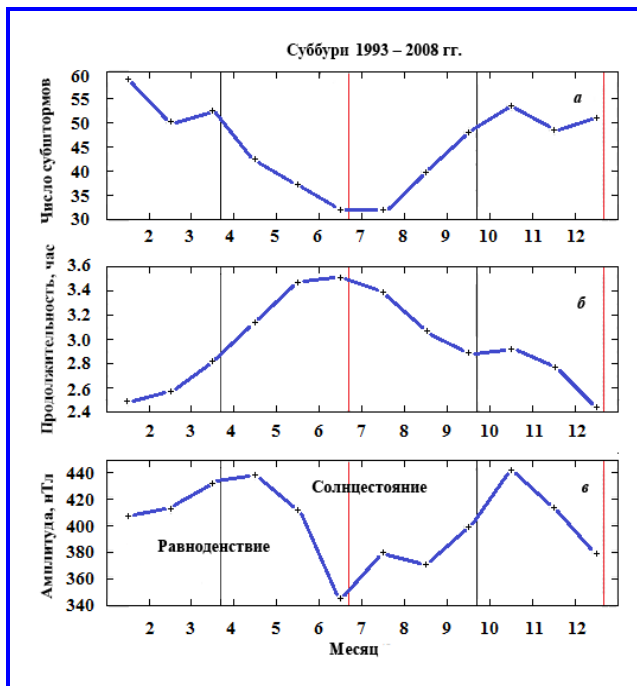


Рис. 12. Средние для 1993 – 2008 гг. среднемесячные вариации: *a* – числа субштормов; *б* – продолжительности (время наблюдения) субштормов; *в* – максимальной амплитуды. Момент солнечного равноденствия показан прямой черной вертикальной линией, момент солнцестояния – прямой красной линией [16]

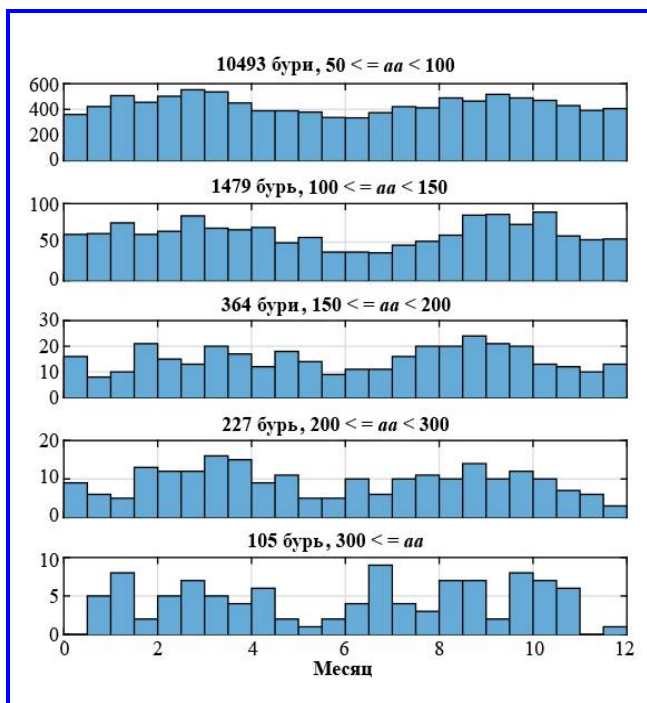


Рис. 13. Годовое распределение числа магнитных бурь в соответствии с величиной *aa*-индекса геомагнитной активности [17]. Приведены полумесячные величины магнитных штормов

и от внутримангитосферных процессов (асимметрия лето – зима длительности суббурь вызвана изменением ионосферной проводимости). Исследование магнитных штормов на основе динамики *aa*-индекса геомагнитной активности за ~140 лет (1868 – 2010 гг.) приведено в работе [17]. Индекс *aa* имеет самый длинный непрерывный ряд данных, известен с 1868 г. На рис. 13 представлено распределение числа штормов в соответствии с величинами *aa*-индекса, от слабых (Minor, $Kp \sim 5$) до экстремальных штормов ($Kp \sim 9$) [17]. Анализ показал наличие сезонных вариаций для всего диапазона магнитных бурь, при этом глубина модуляции увеличивается при увеличении мощности бури.

Сезонные вариации зависят от типа источника магнитных бурь: наиболее значительные сезонные вариации регистрируются у магнитных бурь, вызванных HSS; магнитные бури, вызванные CME, в течение года распределены более равномерно.

В работе [18] проведен анализ сезонных вариаций геомагнитной активности при исследовании динамики *Kp*-индекса для 7 циклов солнечной активности (17 – 23 циклы). На рис. 14 представлены среднегодовые суточные значения *Kp*-индекса и чисел Вольфа за период с 1932 по 2014 год.

Для выделения низкочастотных (период >27 суток) вариаций геомагнитной активности в работе проведен спектральный анализ суточных значений *Kp*-индекса за 1932 – 2014 гг. Результаты представлены на рис. 15. Наибольшая плотность спектра мощности наблюдается для периодов ~183 суток (полугодовая сезонная вариация).

На рис. 16 в качестве примера сезонных вариаций приведены среднемесячные значения *Ap*-индекса (линейный аналог *Kp*-индекса, коэффициент корреляции ~95%) для 1994 г., 2003 г. и 2006 г.

Сравнение динамики *Ap*-индекса для 1994 г. и 2003 г. (годы максимальной геомагнитной активности) показывает, что средняя сезонная модуляция (весна – лето) не зависит от уровня геомагнитной активности и составляет ~58% для 1994 г. и не регистрируется в 2003 г. (рис. 16, верхняя панель). Сравнение динамики *Ap*-индекса для 1994 г. и 2006 г. (низкая геомагнитная активность) показывает наличие сезонной модуляции при разных уровнях геомагнитной активности – ~16% для 2006 г. и 58% для 1994 г. (рис. 16, нижняя панель). Для выделения сезонных вариаций для каждого года проведен анализ суточных распределений.

По типу внутригодовых распределений *Kp*-индекса на рис. 14 цветными маркерами отмечены годы: зеленый треугольник – значительные вариации весна – осень ($\geq 15\%$), красный треугольник – нерегулярная динамика, синий треугольник – вариации слабые.

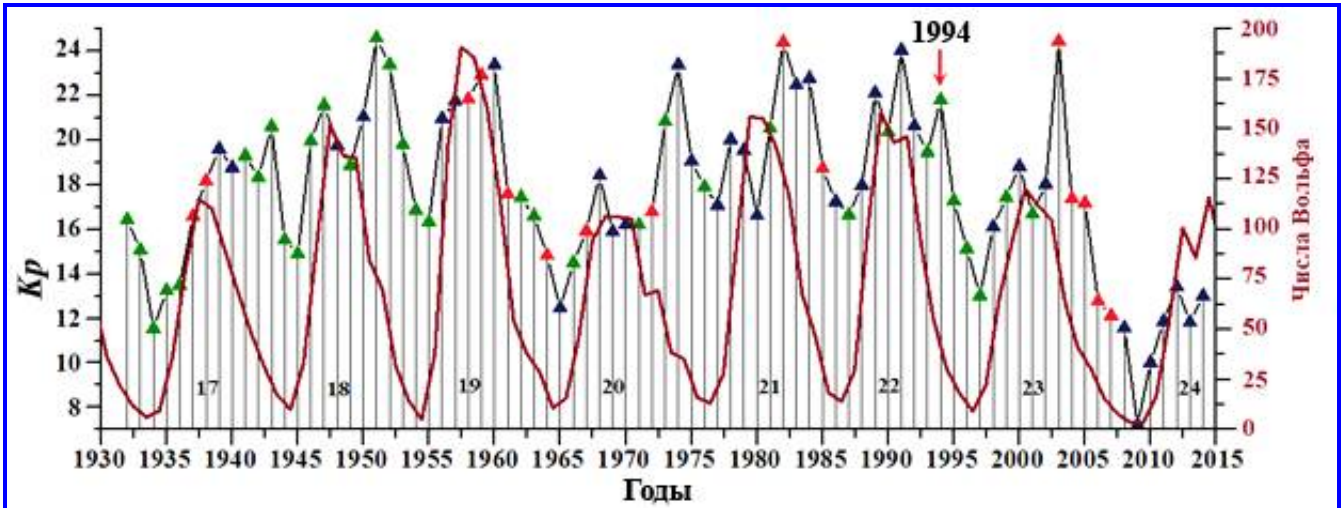


Рис. 14. Среднегодовые среднесуточные значения *Kp*-индексов за период с 1932 по 2014 годы (17 – 24 циклы солнечной активности). Зелёными треугольниками отмечены года, когда наблюдались значительные сезонные вариации *Kp*-индекса геомагнитной активности. Синим цветом – года, когда сезонные вариации были почти не заметны. Красным цветом – года, когда сезонные вариации не наблюдались. Коричневым цветом показаны среднегодовые величины чисел Вольтфа

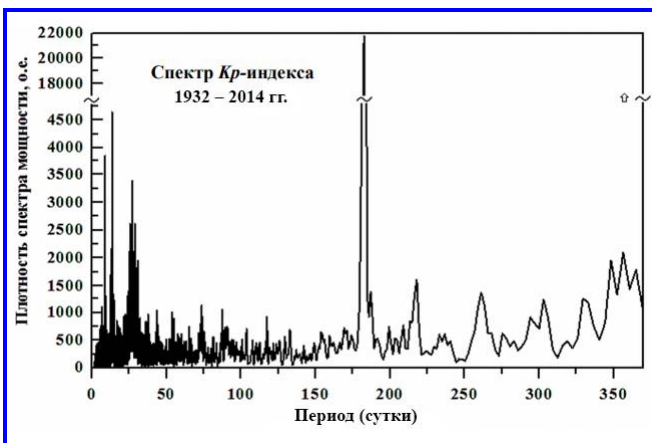


Рис. 15. Спектральная плотность мощности флуктуаций *Kp*-индекса геомагнитной активности (относительные единицы)

Годовое распределение числа случаев (лет) по типу сезонных вариаций очень неравномерно, изменяется от цикла к циклу, слабо зависит от фазы солнечного цикла и не зависит от направления магнитного поля Солнца (за время 7 циклов магнитное поле несколько раз меняло знак). На фазе возрастания солнечных циклов (17 лет) в 59% случаев регистрируются значительные сезонные вариации, для 35% случаев вариации слабые, в 6% случаев вариации не наблюдаются. Для фазы спада циклов (39 лет) эти величины соответственно равны: 39%, 11% и 11%; для максимума активности (18 лет) – 43%, 28% и 28%. Можно выделить солнечные циклы, для которых на фазе спада устойчиво регистрируется определенный тип годового распределения *Kp*-индекса: для 17, 18 и 22 циклов

регистрируются значительные сезонные вариации, для 23 цикла – отсутствие сезонных вариаций. На рис. 17 представлены среднесесячные величины *Ap*-индекса (усредненные за период) для спада солнечной активности для 20 (1974 – 1978 гг.), 22 (1994 – 1997 гг.) и 23 (2003 – 2006 гг.) циклов и для максимумов активности для 21, 22 и 23 циклов (1979 – 1981 гг., 1989 – 1991 гг., 2000 – 2002 гг.).

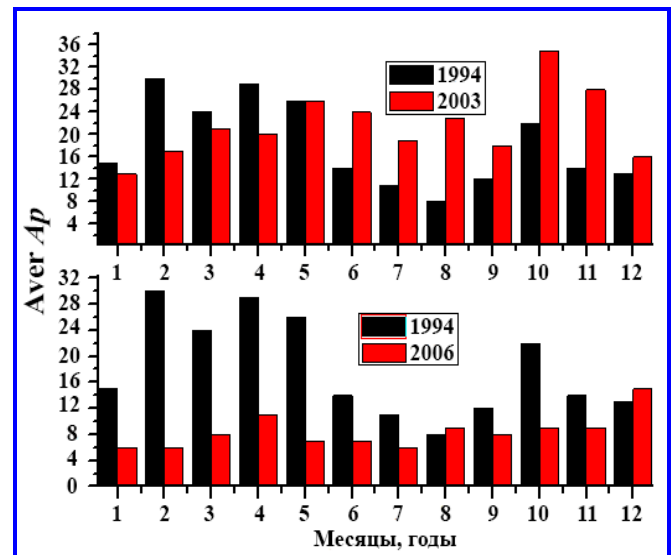


Рис. 16. Сравнение динамики среднесесячных величин *Ap*-индекса геомагнитной активности для периодов максимальной геомагнитной активности (верхняя панель – 1994 г., 2003 г.). Сравнение динамики среднесесячных величин *Ap*-индекса для периодов максимальной (1994 г.) и низкой (2006 г.) геомагнитной активности (нижняя панель)

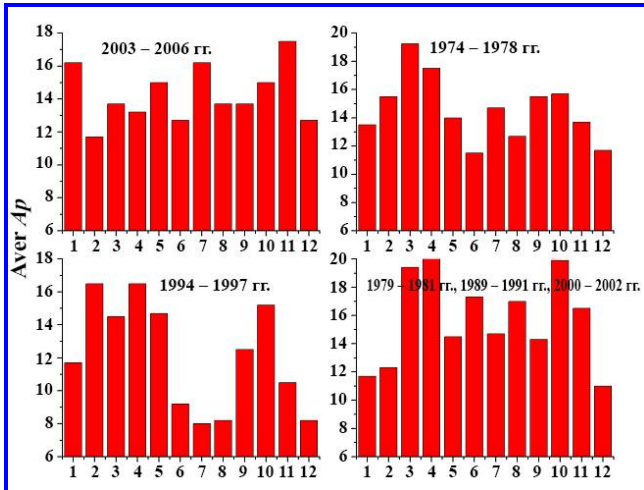


Рис. 17. Среднемесячные величины A_p -индекса (усредненные за период) для периодов спада солнечной активности для 20 (1974 – 1978 гг.), 22 (1994 – 1997 гг.) и 23 (2003 – 2006 гг.) циклов и для периодов максимумов активности для 21, 22 и 23 циклов (1979 – 1981 гг., 1989 – 1991 гг., 2000 – 2002 гг.)

Средняя сезонная модуляция (весна-лето) равна ~44% для 22 цикла, ~23% для 20 цикла, ~0% для 23 цикла и равна ~10% для периодов максимумов активности. На рис. 18 показана динамика Kp -индекса для трех видов годовых распределений величин Kp -индекса: для событий с сильными вариациями годовых распределений (усреднение по 34 событиям), для событий с нерегулярной динамикой Kp -индекса (усреднение по 15 событиям) и для промежуточных случаев, вариации слабые (усреднение по 34 событиям).

Средние величины модуляции по всем выделенным событиям составляют: для событий с сильной годовой модуляцией ~14%, для событий с нерегулярной динамикой <2%, для промежуточных

случаев ~7,5%. Статистика такова: за 83 года (7 солнечных циклов) сезонные вариации разной амплитуды наблюдаются в 68 случаях (82% от общего количества) и в 15 (18%) случаях сезонные вариации не наблюдаются.

В заключение отметим некоторые наиболее значимые экспериментальные результаты исследования связи периодических вариаций солнечной и геомагнитной активности для 17 – 24 циклов солнечной активности (1932 – 2019 гг.).

1. Циклы солнечной активности (средний период ~11 лет) формируют 11-летние вариации геомагнитной активности. Циклы солнечной и геомагнитной активности по времени не совпадают: максимумы и минимумы геомагнитной активности регистрируются на несколько лет позднее (в среднем ~2 – 4 года) максимумов и минимумов солнечной активности.

2. Суммарная геомагнитная активность не зависит от полного числа солнечных пятен в цикле. Для 17 – 23 циклов средняя суммарная геомагнитная активность $\Sigma Kp_{цикл} = 197$ (максимальные отклонения +5/-6 %); среднее суммарное число солнечных пятен $\Sigma SSN_{цикл} = 1099$ (максимальные отклонения +23/-9 %). Для 17 – 23 циклов максимальная геомагнитная активность в цикле $Kp_{макс} = 23,6$ (максимальные отклонения +4/-13 %) регистрируется на фазе спада солнечных циклов и почти не зависит от цикла солнечной активности.

3. Параметры 24 цикла солнечной активности значительно отличаются от средних значений 17 – 23 циклов: на ~50% уменьшается суммарное число солнечных пятен, полная геомагнитная активность в цикле и максимальная геомагнитная активность уменьшаются ~ на 30%.

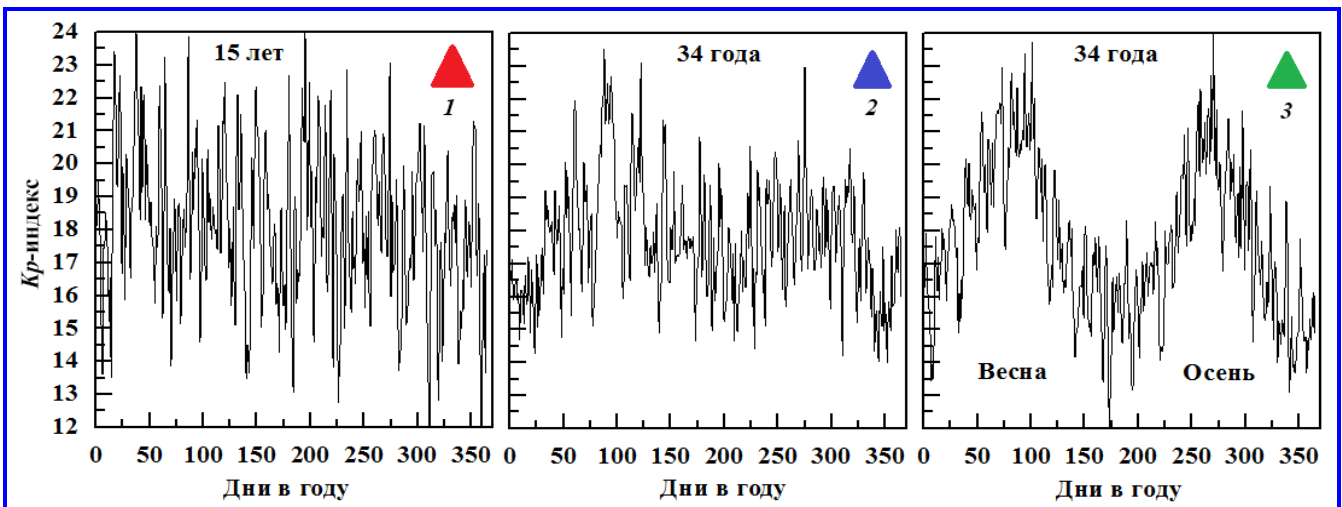


Рис. 18. Среднесуточные значения Kp -индексов геомагнитной активности, усредненные: 1 – за 15 лет (годы, выделенные красными треугольниками на рис. 14); 2 – за 34 года (годы, выделенные синими треугольниками на рис. 14); 3 – за 34 года (годы, выделенные зелеными треугольниками на рис. 14)

4. Годовая динамика геомагнитной активности в цикле определяется годовым распределением основных структур СВ: высокоскоростных потоков СВ, потоков медленного ветра (SSW) и корональных выбросов. На фазе спада и вблизи минимума солнечной активности в основном регистрируются магнитосферные бури типа G1 ($Kp \sim 5$) и G2 ($Kp \sim 6$), вызванные рекуррентными высокоскоростными потоками СВ. На фазе роста солнечного цикла и вблизи максимума активности возрастает число магнитосферных бурь типа G2 ($Kp \sim 6$), вызванных корональными выбросами. Магнитосферные бури типа $\geq G3$ ($Kp \geq 7$) наблюдаются на фазе роста и вблизи максимума активности и, в основном, связаны с корональными выбросами.

5. Рекуррентная геомагнитная активность формируется рекуррентными высокоскоростными потоками солнечного ветра (существующими несколько солнечных оборотов). Гелиоширота источника определяет период рекуррентной геомагнитной активности, в частности, период вариаций геомагнитных индексов. Изменение рекуррентного периода от 26 суток в 2007 г. до 30 суток в 2009 г. и до 28 суток в 2010 г. связано с изменением гелиошироты источников HSS: в 2007 г. – это низкоширотные корональные дыры, в 2009 г. – это высокоширотная корональная дыра, в 2010 г. – это среднеширотные корональные дыры.

6. В работе проведен анализ сезонных вариаций геомагнитной активности на основе динамики Kp -индекса для 7 циклов солнечной активности (17 – 23 циклы). Годовое распределение числа случаев (лет) по типу сезонных вариаций (весна – лето) очень неравномерно, изменяется от цикла к циклу, слабо зависит от фазы солнечного цикла и не зависит от направления магнитного поля Солнца (за время 7 циклов магнитное поле несколько раз меняло знак). Средняя сезонная модуляция (весна – лето) не зависит от уровня геомагнитной активности и не зависит от фазы солнечного цикла. На фазе возрастания солнечных циклов (17 лет) в 59% случаях регистрируются значительные сезонные вариации, для 35% случаев вариации слабые, в 6% случаях вариации не наблюдаются. Для фазы спада циклов (39 лет) эти величины соответственно равны: 39%, 11% и 11%; для максимума активности (18 лет) – 43%, 28% и 28%.

7. Статистика динамики сезонных вариаций геомагнитной активности для периода 1932 – 2014 гг.: за 83 года (7 солнечных циклов) сезонные вариации разной амплитуды наблюдаются в 68 случаях (82% от общего количества) и в 15 (18%) случаях сезонные вариации не наблюдаются. Можно выде-

лить события с сильными вариациями $\sim 14\%$ (усреднение по 34 событиям), события с нерегулярной динамикой Kp -индекса $< 2\%$ (усреднение по 15 событиям) и промежуточные случаи, вариации слабые $\sim 7,5\%$ (усреднение по 34 событиям).

Литература

1. Динамика солнечной и геомагнитной активности. I. Источники геомагнитной активности, корональная масс-эжекция, высокоскоростные потоки солнечного ветра / И. П. Безродных, Е. И. Морозова, А. А. Петрукович [и др.] // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – М. : АО «Корпорация «ВНИИЭМ», 2019. – Т. 170. – № 3. – С. 13 – 27.
2. The Floor in the Solar Wind Magnetic Field Revisited / E. W. Cliver, A. G. Ling // Solar Phys, 2011. – Vol. 274. – Issue 1-2. – P. 285 – 301. – Doi 10.1007/s11207-010-9657-6.
3. Cyclic loss of open solar flux since 1868: The link to heliospheric current sheet tilt and implications for the Maunder Minimum / M. J. Owens, and M. Lockwood // J. Geophys. Res., 2012. – 117. – A04102. – Doi:10.1029/2011JA017193.
4. Solar wind drivers of geomagnetic storms during more than four solar cycles / Ian G. Richardson and V. Hilary Cane // J Space Weather Space Clim, 2 (2012). – A01. – Doi: 10.1051/swsc/2012001.
5. If the Sun is so quiet, why is the Earth ringing? A comparison of two solar minimum intervals / S. E. Gibson, J. U. Kozyra, G. de Toma [at all] // Journal of geophysical research, 2009. – Vol. 114. – A09105. – Doi: 10.1029/2009JA014342.
6. Формирование периодических структур в потоках солнечного ветра и в магнитосфере Земли в период минимума солнечной активности 2006 – 2010 гг. / И. П. Безродных, Е. И. Морозова, А. А. Петрукович [и др.] // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – М. : АО «Корпорация «ВНИИЭМ», 2015. – Т. 145. – № 2. – С. 27 – 41.
7. Preferred solar wind emitting longitudes on the Sun / J. T. Gosling, J. R. Asbridge, S. J. Bame, W. C. Feldman // J. Geophys. Res. – 1977. – 82. – P. 2371 – 2376.
8. Sunspots and terrestrial magnetic phenomena, 1898 – 1911: The cause of the annual variation in magnetic disturbances / A. L. Cortie // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. – 1912. – Vol. 73. – P. 52 – 60.
9. On the annual variation of magnetic disturbances / D. H. McIntosh // Philos. Trans. R. Soc. – London, 1959. – Ser. A251. – P. 525 – 552.
10. Semiannual variation of geomagnetic Activity / C. T. Russell and R. L. McPherron // J. Geophys. Res. – 1973. – Vol. 78. – P. 92 – 108.
11. The semiannual variation of great geomagnetic storms / L. Svalgaard, E. W. Cliver and A. G. Ling // Geophys. Res. Lett. – 2002. – Vol. 29(16). – P. 1765. – Doi: 10.1029/2001GL014145.
12. The semiannual variation of geomagnetic activity: Phases and profiles for 130 years of aa data / E. W. Cliver, Y. Kamide and A. G. Ling // J. Atmos. Sol. Terr. Phys. – 2002. – Vol. 64. – P. 47 – 5319.
13. ap-index solar wind driving function and its semiannual variations / A. A. Petrukovich and M. Y. Zakharov // Ann.

- Geophys. – 2007. – Vol. 25. – P. 1465 – 1469. – URL: www.ann-geophys.net/25/1465/2007.
14. Seasonal and diurnal variation of geomagnetic activity: Russell-McPherron effect during different IMF polarity and/or extreme solar wind conditions / H. Zhao and Q.-G. Zong // J. Geophys. Res. – 2012. – Vol. 117. – A11222. – Doi:10.1029/2012JA017845.
15. Seasonal and diurnal variation of geomagnetic activity: Revised Dst versus external drivers / L. V. T. Hakkinen, T. I. Pulkkinen, R. J. Pirjola [at all] // J. Geophys. Res. – 108 (A2). – 1060. – Doi:10.1029/2002JA009428 2003.
16. From space weather toward space climate time scales: Substorm analysis from 1993 to 2008 / E. I. Tanskanen, T. I. Pulkkinen, A. Viljanen, K. Mursula, N. Partamies, and J. A. Slavin // J. Geophys. Res., 2011. – Vol. 116. – A00134. – Doi:10.1029/2010JA015788.
17. Extreme Geomagnetic Storms – 1868 – 2010 / S. Vennerstrom, L. Lefevre, M. Dumbovi'c [at all] // Solar Phys. – 2016. – 291. – P. 1447 – 1481. – Doi 10.1007/s11207-016-0897-у.
18. Динамика K_p -индекса геомагнитной активности для семи солнечных циклов (период 1932 – 2014 годов). Сезонные вариации / И. П. Безродных, Е. И. Морозова, А. А. Петрукович [и др.] // М. : АО «Корпорация «ВНИИЭМ», 2018. – Т. 167. – № 6. – С. 48 – 56.

Поступила в редакцию 08.08.2019

Иннокентий Петрович Безродных, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, т. (495) 333-20-00, e-mail: d54x@mail.ru.

Евгения Ивановна Морозова, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, т. (495) 333-20-00, e-mail: morozova.evgeniya2014@yandex.ru.

Анатолий Алексеевич Петрукович, член-корреспондент РАН, директор ИКИ РАН, т. (495) 333-32-67, e-mail: apetruko@iki.rssi.ru. (ИКИ РАН).

Максим Владимирович Кожухов, кандидат технических наук, начальник лаборатории, т. (495) 366-38-38, e-mail: d18188@mail.ru. (АО «Корпорация «ВНИИЭМ»).

DYNAMICS OF SOLAR AND GEOMAGNETIC ACTIVITY. II. PERIODIC VARIATIONS IN SOLAR AND GEOMAGNETIC ACTIVITY

I. P. Bezrodnykh, E. I. Morozova,
A. A. Petrukovich, M. V. Kozhukhov

The paper considers the relationship between the dynamics of geomagnetic activity and periodic variations in solar activity. For 8 cycles of solar activity (17 – 24 cycles), the dynamics of the total annual geomagnetic activity in the cycle and the dynamics of the total number of sunspots in the cycle are analyzed. The total geomagnetic activity does not depend on the total number of sunspots in the cycle. The maximum geomagnetic activity in the cycle is recorded at declining solar cycle phase and is almost independent of the solar activity cycle. The relationship between the heliolatitude of the source (coronal holes) and the period of recurrent geomagnetic activity is shown. It is shown that the power distribution among the harmonics of the periodic structure of the SW velocity and geomagnetic indices in 2006 – 2010 is associated with a change in the heliolatitude of the main HSS sources. The paper analyzes seasonal variations in geomagnetic activity based on the dynamics of the K_p -index for 7 cycles of solar activity (17 – 23 cycles). The annual distribution of the number of cases (years) by the type of seasonal variation (spring-summer) is very uneven, varies from cycle to cycle, weakly depends on the phase of the solar cycle and does not depend on the direction of the solar magnetic field. For the period 1932 – 2014: seasonal variations of different amplitudes are observed in 68 cases (82% of the total) and in 15 (18%) cases, seasonal variations are not observed.

Key words: cycles of solar and geomagnetic activity, recurrent geomagnetic activity, seasonal variations, coronal holes.

References

1. Dynamics of solar and geomagnetic activity. I. Geomagnetic activity sources, coronal mass ejection, high-speed solar wind streams / I. P. Bezrodnykh, E. I. Morozova, A. A. Petrukovich [at all] // Matters of Electromechanics. VNIEM Proceedings. – М. : JC «VNIEM Corporation», 2019. – Vol. 170. – No. 3. – Pp. 13 – 27.
2. The Floor in the Solar Wind Magnetic Field Revisited / E. W. Cliver, A. G. Ling // Solar Phys, 2011. – Vol. 274. – Issue 1-2. – P. 285 – 301. – Doi 10.1007/s11207-010-9657-6.
3. Cyclic loss of open solar flux since 1868: The link to heliospheric current sheet tilt and implications for the Maunder Minimum / M. J. Owens, and M. Lockwood // J. Geophys. Res., 2012. – 117. – A04102. – Doi:10.1029/2011JA017193.
4. Solar wind drivers of geomagnetic storms during more than four solar cycles / Ian G. Richardson and V. Hilary Cane // J Space Weather Space Clim, 2 (2012). – A01. – Doi: 10.1051/swsc/2012001.
5. If the Sun is so quiet, why is the Earth ringing? A comparison of two solar minimum intervals / S. E. Gibson, J. U. Kozyra, G. de Toma [at all] // Journal of geophysical research, 2009. – Vol. 114. – A09105. – Doi: 10.1029/2009JA014342.

6. Generation of periodic structures in the solar-wind flux of earth's magnetosphere during the minimal solar activity period in 2006 – 2010 / I. P. Bezrodnykh, E. I. Morozova, A. A. Petrukovich [at all] // Matters of Electromechanics. VNIIEM Proceedings. – M. : JC «VNIIEM Corporation», 2015. – Vol. 145. – No. 2. – Pp. 27 – 41.
7. Preferred solar wind emitting longitudes on the Sun / J. T. Gosling, J. R. Asbridge, S. J. Bame, W. C. Feldman // J. Geophys. Res. – 1977. – 82. – P. 2371 – 2376.
8. Sunspots and terrestrial magnetic phenomena, 1898 – 1911: The cause of the annual variation in magnetic disturbances / A. L. Cortie // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. – 1912. – Vol. 73. – P. 52 – 60.
9. On the annual variation of magnetic disturbances / D. H. McIntosh // Philos. Trans. R. Soc. – London, 1959. – Ser. A251. – P. 525 – 552.
10. Semiannual variation of geomagnetic Activity / C. T. Russell and R. L. McPherron // J. Geophys. Res. – 1973. – Vol. 78. – P. 92 – 108.
11. The semiannual variation of great geomagnetic storms / L. Svalgaard, E. W. Cliver and A. G. Ling // Geophys. Res. Lett. – 2002. – Vol. 29(16). – P. 1765. – Doi: 10.1029/2001GL014145.
12. The semiannual variation of geomagnetic activity: Phases and profiles for 130 years of aa data / E. W. Cliver, Y. Kamide and A. G. Ling // J. Atmos. Sol. Terr. Phys. – 2002. – Vol. 64. – P. 47 – 5319.
13. ap-index solar wind driving function and its semiannual variations / A. A. Petrukovich and M. Y. Zakharov // Ann. Geophys. – 2007. – Vol. 25. – P. 1465 – 1469. – URL: www.ann-geophys.net/25/1465/2007.
14. Seasonal and diurnal variation of geomagnetic activity: Russell-McPherron effect during different IMF polarity and/or extreme solar wind conditions / H. Zhao and Q.-G. Zong // J. Geophys. Res. – 2012. – Vol. 117. – A11222. – Doi:10.1029/2012JA017845.
15. Seasonal and diurnal variation of geomagnetic activity: Revised Dst versus external drivers / L. V. T. Hakkinen, T. I. Pulkkinen, R. J. Pirjola [at all] // J. Geophys. Res. – 108 (A2). – 1060. – Doi:10.1029/2002JA009428 2003.
16. From space weather toward space climate time scales: Substorm analysis from 1993 to 2008 / E. I. Tanskanen, T. I. Pulkkinen, A. Viljanen, K. Mursula, N. Partamies, and J. A. Slavin // J. Geophys. Res., 2011. – Vol. 116. – A00134. – Doi:10.1029/2010JA015788.
17. Extreme Geomagnetic Storms – 1868 – 2010 / S. Vennerstrom, L. Lefevre, M. Dumbovi'c [at all] // Solar Phys, – 2016. – 291. – P. 1447 – 1481. – Doi 10.1007/s11207-016-0897-y.
18. Dynamics of Kp -index of geomagnetic activity for seven solar cycles (over the period of 1932 – 2014). Seasonal variations / I. P. Bezrodnykh, E. I. Morozova, A. A. Petrukovich [at all] // Matters of Electromechanics. VNIIEM Proceedings. – M. : JC «VNIIEM Corporation», 2018. – Vol. 167. – No. 6. – Pp. 48 – 56.

Innokentii Petrovich Bezrodnykh, Candidate of Physics and Mathematics (Ph. D.), Senior Researcher,
tel.: + 7 (495) 333-20-00, e-mail: d54x@mail.ru.
IKI RAN (Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences).
(JC «VNIIEM Corporation»).

Evgeniia Ivanovna Morozova, Candidate of Physics and Mathematics (Ph. D.), Senior Researcher,
tel.: + 7 (495) 333-20-00, e-mail: morozova.evgeniya2014@yandex.ru.

Anatolii Alexeevich Petrukovich, Corresponding member of the Russian Academy of Sciences,
Deputy Director General of IKI RAN, tel.: + 7 (495) 333-32-67, e-mail: apetruko@iki.rssi.ru.
IKI RAN (Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences).

Maxim Vladimirovich Kozhukhov, Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Head of Laboratory,
tel.: (495)366-38-38, e-mail: d18188@mail.ru.
(JC «VNIIEM Corporation»).