

КОСМИЧЕСКАЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА. КОСМИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ. ИССЛЕДОВАНИЕ ОКОЛОЗЕМНОГО КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА

УДК 523.98

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, М. В. Кожухов

Рассмотрены основные вопросы, связанные с влиянием изменения структуры потоков солнечного ветра при воздействии корональной масс-эжекции и высокоскоростных потоков на геомагнитную активность. Показаны характерные отличия динамики параметров солнечного ветра в их структурах. В процессе развития солнечной активности меняется годовое распределение числа корональных выбросов и высокоскоростных потоков – основных источников магнитных бурь, составляющих геомагнитную активность. Динамика геомагнитной активности при воздействии корональной масс-эжекции и высокоскоростных потоков связана с образованием целого ряда структур, возникающих в солнечном ветре при движении в межпланетном пространстве корональных выбросов и высокоскоростных потоков. Их область взаимодействия вблизи Земли достигает $\sim 0,2 - 0,3$ АЕ. Такая область возмущенного солнечного ветра называется межпланетной корональной масс-эжекцией. Перед ней образуется ряд структур возмущенного солнечного ветра: быстрая ударная волна, между ударной волной и передним краем коронального выброса формируется слой плотной горячей плазмы. Одним из видов корональных выбросов являются магнитные облака. При распространении высокоскоростных потоков в солнечном ветре образуется область взаимодействия потоков медленного и быстрого солнечного ветра. Постепенное увеличение скорости солнечного ветра сопровождается увеличением плотности и температуры плазмы и увеличением магнитного поля, максимальные величины этих параметров, как правило, регистрируются до максимума скорости. Основными драйверами динамики геомагнитной активности являются структуры потоков солнечного ветра, сформированные вблизи Земли. На разных фазах солнечной активности они проявляются по-разному. Наличие в структурах потоков солнечного ветра отрицательной компоненты межпланетного магнитного поля повышает вероятность образования магнитной бури и увеличивает ее мощность. В работе использованы экспериментальные данные по динамике параметров солнечного ветра и межпланетного магнитного поля в структурах межпланетной корональной масс-эжекции и в областях взаимодействия потоков медленного и быстрого солнечного ветра.

Ключевые слова: источники геомагнитной активности, корональная масс-эжекция, высокоскоростные потоки солнечного ветра, взаимодействия потоков медленного и быстрого солнечного ветра, магнитные облака.

Введение

Предлагаемый обзор «Динамика солнечной и геомагнитной активности» состоит из трех частей и посвящен анализу современных представлений о связи геомагнитной активности с динамическими процессами в солнечной короне. Связь геомагнитной активности с процессами на Солнце была установлена в середине XIX века. Корреляция числа солнечных вспышек с числом геомагнитных возмущений и числом и яркостью полярных сияний была рассмотрена Кэррингтоном уже в 1860 г., была найдена 11-летняя периодичность в динамике числа солнечных пятен и в динамике геомагнитных возмущений и полярных сияний. 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 коро-

нальных выбросов и высокоскоростных потоков солнечного ветра. Магнитные бури – это эффективные драйверы целого ряда магнитосферных процессов, динамика которых во многом определяет возможности использования современным высокотехнологичным обществом околоземного пространства.

Структура потоков солнечного ветра

Исследование динамики геомагнитной активности тесно связано с необходимостью решения целого ряда технических проблем, возникающих при эксплуатации промышленных энергосистем, спутниковых коммуникационных систем (GPS-навигация, КВ-связь). Динамика геомагнитной активности формируется как отклик магнитосферных параметров на изменение структуры потоков солнечного ветра (СВ, Solar Wind – SW). Три основных источника определяют геомагнитную активность: высокоскоростные (скорость $> \sim 450$ км/с) потоки СВ (high stream speed – HSS); корональные выбросы (корональная масс-эжекция, coronal mass ejection –

СМЕ) и медленный СВ (slow solar wind – SSW). Наиболее значительные крупномасштабные вариации геомагнитной активности (магнитные бури или штормы) связаны с влиянием корональных выбросов и высокоскоростных потоков СВ [1, 2]. Далее используем термин СМЕ- и HSS-бури. СМЕ-бури в среднем длятся меньше 2 суток, HSS-бури длятся несколько суток и могут наблюдаться в течение нескольких солнечных оборотов. Источниками высокоскоростных потоков СВ являются корональные дыры (coronal hole – CH), они наблюдаются на фазе спада солнечного цикла, часто существуют несколько солнечных оборотов, что приводит к рекуррентной (около 27 дней) геомагнитной активности [3, 4]. На Солнце корональные дыры – это области низкой плотности и температуры плазмы, области открытых униполярных магнитных полей. Идентификация CH основана, в частности, на измерении спектральной яркости корональных структур (в ультрафиолетовом диапазоне длин волн), корональные дыры проявляются как темные области на поверхности Солнца [5]. На рис. 1 показано распределение на Солнце корональных дыр 5 марта 2018 г. (URL: <https://sohowww.nascom.nasa.gov/data/archive/EIT>).

Корональные выбросы – это случайные взрывные процессы в солнечной короне, которые сопровождаются выбросом в межпланетное пространство значительного количества вещества и магнит-

ного поля. Корональные выбросы связаны с солнечными вспышками и исчезновением активных волокон [6]. Они наблюдаются, в основном, вблизи максимума солнечного цикла. На рис. 2, а показано изображение солнечной короны на расстоянии $\sim 8,4 \cdot 10^6$ км от Солнца при выбросе коронального вещества 27 февраля 2000 г. На рис. 2, б показано изображение коронального выброса спустя ~ 6 часов после эжекции на расстоянии $\sim 22,5 \cdot 10^6$ км от Солнца.

На рис. 2, б четко выделяются отдельные структуры в потоках СВ, формируемые при движении коронального выброса: яркий ободок – ударная волна, более светлая часть – область меньшей плотности, переходная область (cavity), яркое пятно – корональный выброс (URL : <https://sohowww.nascom.nasa.gov/data/archive/LASCO>).

При СМЕ- и HSS-бурях в магнитосфере происходит диссипация энергии СВ, конверсия энергии осуществляется в разных формах, например, при инжекции и распаде кольцевого тока (ring current), при ионосферном нагревании (ionospheric joule heating), выпадении частиц в атмосферу (Precipitation). Полный вклад энергии СВ при формировании СМЕ и HSS оценивается в $\sim 6,38 \cdot 10^{16}$ Дж для HSS и $\sim 8,07 \cdot 10^{16}$ Дж для СМЕ. Это средние величины за 1995 – 2004 гг. [7].

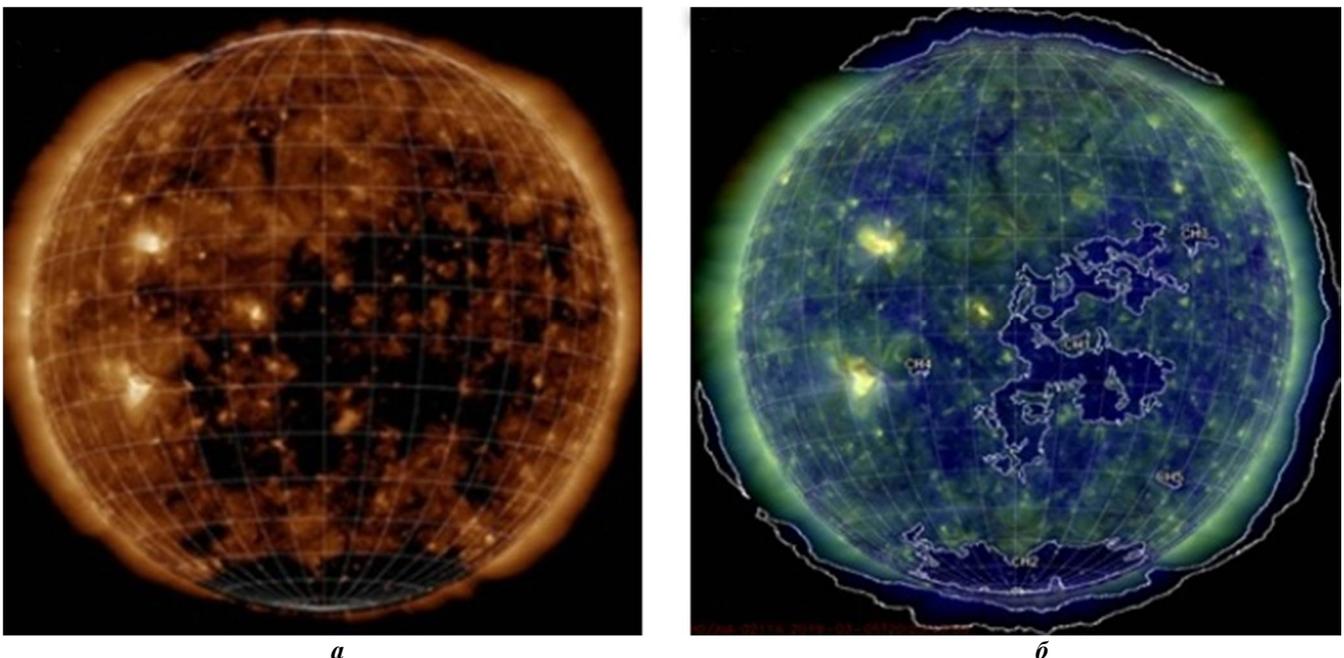
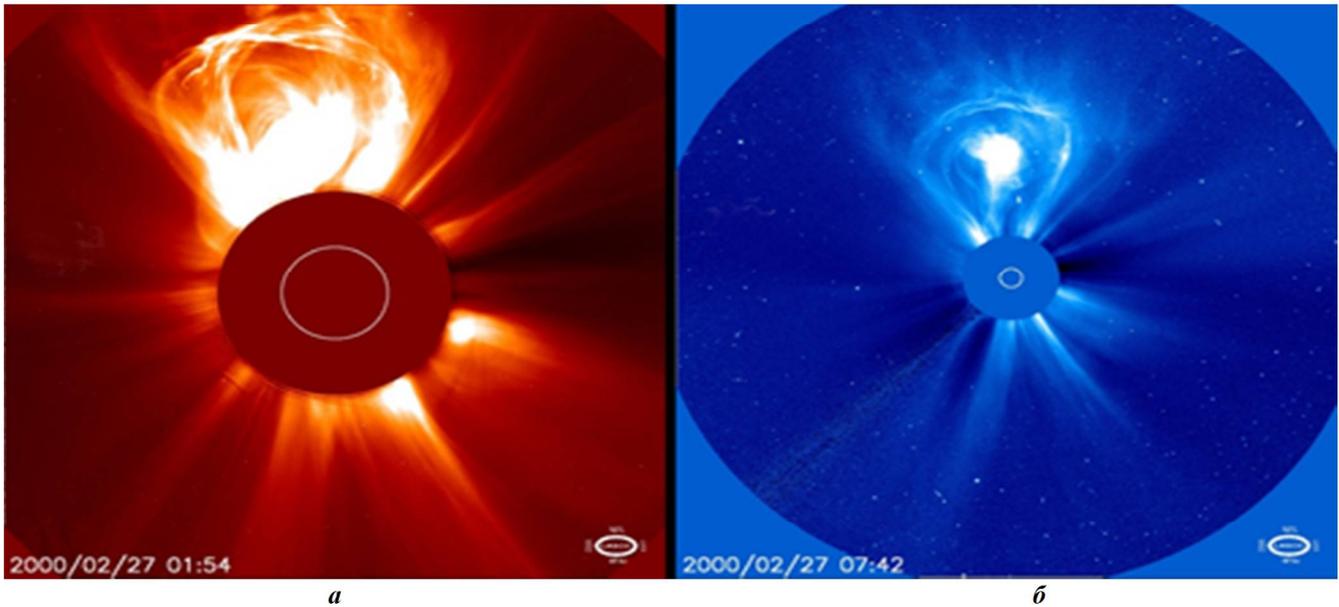


Рис. 1. Распределение яркости корональных структур в солнечной атмосфере 5 марта 2018 г.:
а – 07.20 UT; для длины волны – 193А, что соответствует температуре $\sim 1,5 \cdot 10^6$ К;
б – 20.23 UT; для двух длин волн – 193А (зеленый цвет – температура $\sim 1,5 \cdot 10^6$ К) и 171А
 (синий цвет – температура $\sim 1,0 \cdot 10^6$ К). Темные области – корональные дыры,
 яркие пятна – активные области



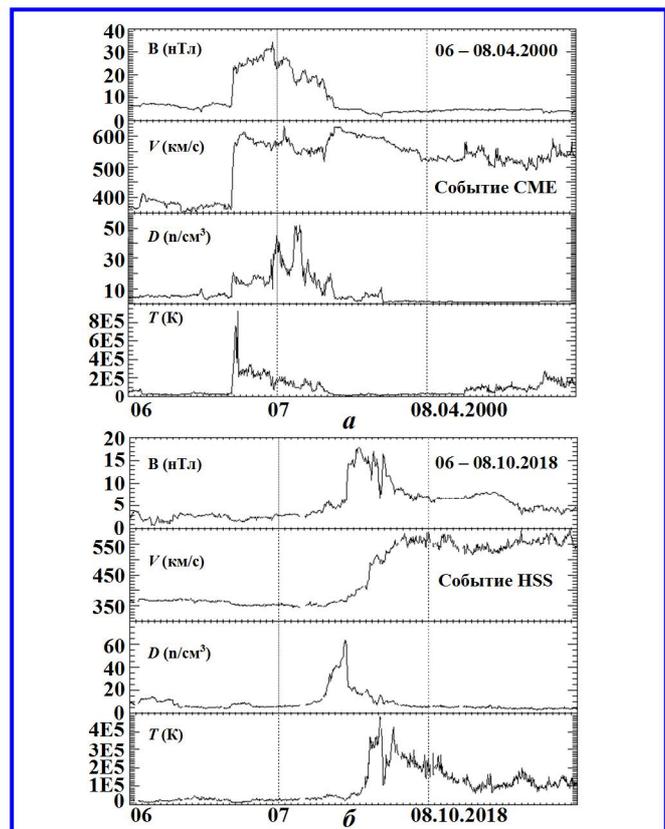
**Рис. 2. Изображения солнечной короны при выбросе коронального вещества 27 февраля 2000 г.:
 а – изображение внутренней области короны до расстояния порядка $8,4 \cdot 10^6$ км от Солнца;
 б – изображение солнечной короны на расстоянии порядка $45 \cdot 10^6$ км от Солнца спустя ~6 часов
 после эжекции. Измерения солнечной короны проводились прибором LASCO
 (Large Angle Spectrometric Coronagraph) на спутнике SOHO**

Эффективность диссипации (конверсии энергии в магнитосфере) для HSS-бурь ~73%, (среднее за 91 событие), для CME-бурь эта величина равна ~63% (среднее за 118 событий) [7]. Эффективность оценивается как отношение энергии диссипации, реализуемой при HSS (CME) к энергии СВ, вложенной в HSS (CME). Различие характеристик потоков плазмы СВ для CME и HSS является основой для идентификации CME и HSS. Потоки плазмы в CME характеризуются аномально низкой протонной температурой, низкой электронной температурой, аномалией ионного состава (в частности, повышенным содержанием гелия) [8, 9]. На рис. 3 представлены вариации параметров СВ (скорости, плотности, температуры и магнитного поля) для CME (рис. 3, а) и HSS (рис. 3, б). (URL : https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/sc_merge_min1.html).

Отметим особенности динамики параметров, наиболее характерные для высокоскоростных потоков HSS, связанных с корональными дырами и корональной масс-эжекцией:

1. Для HSS увеличение скорости происходит медленно и в течение длительного периода скорость остается высокой. Для CME скорость повышается быстро, остается высокой небольшой период и далее быстро падает.

2. Для HSS протонная плотность увеличивается значительно на переднем фронте высокоскоростного потока (иногда раньше) и далее быстро падает. Для CME плотность повышается одновременно со скоростью.



**Рис. 3. Вариации параметров солнечного ветра для:
 а – CME-события (6 – 8 апреля 2000 г.); б – HSS-события
 (6 – 8 октября 2018 г.). Сверху вниз: модуль
 межпланетного магнитного поля, В (нТл);
 скорость, V (км/с); протонная плотность (n/cm^3),
 температура ионов, К**

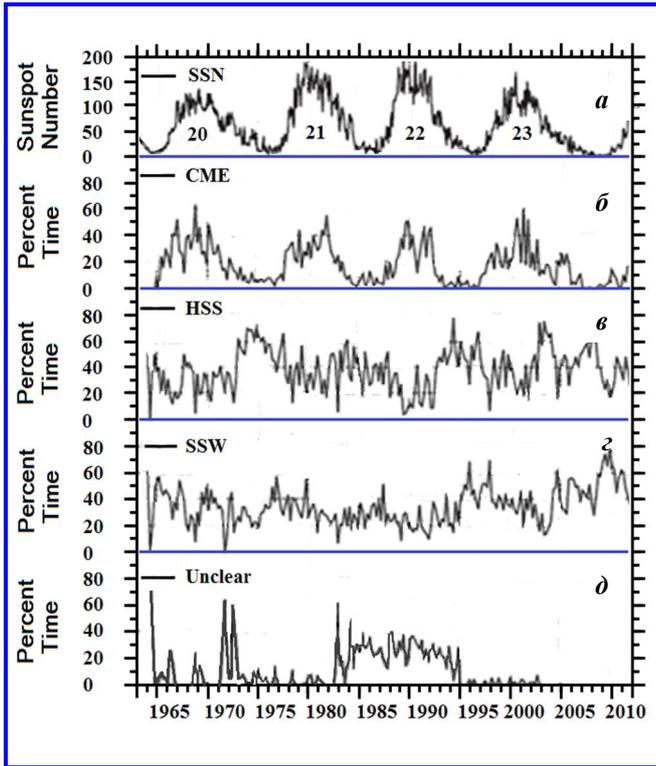


Рис. 4. Графики фаз солнечных циклов для периода 1965 – 2010 гг.: *a* – среднемесячные числа солнечных пятен; *b* – средний по трем солнечным оборотам процент времени, который занимают CME; *c* – рекуррентные высокоскоростные потоки HSS; *d* – медленный солнечный ветер SSW; *e* – неизвестные источники

3. Для HSS температура варьируется со скоростью (долго оставаясь высокой).

Для CME температура быстро падает после начального увеличения при прохождении ударной волны.

4. Для CH HSS-пики магнитного поля и плотности достигаются до максимума скорости.

Для CME HSS-пики скорости, магнитного поля и скорости достигаются почти одновременно. В процессе развития солнечной активности меняется годовое распределение отдельных структур потоков СВ (HSS; CME и SSW) и соответственно изменяется вклад каждой структуры в геомагнитную активность. На рис. 4 [10] для периода 1965 – 2010 гг. показан средний по трем солнечным оборотам процент времени, который занимают явления CME (*b*), рекуррентные HSS (*c*), SSW (*d*) и неизвестные источники (Unclear) (*e*). На рис. 4, *a* показаны среднемесячные числа солнечных пятен (SSN).

Корональные выбросы занимают ~40 – 60 % времени вблизи солнечного максимума и почти отсутствуют (~5%) во время солнечного минимума. Высокоскоростные потоки СВ занимают ~60% времени на спадающей фазе солнечного цикла. Медленный ветер присутствует на всех стадиях цикла. На рис. 5 для периода 1972 – 2005 гг. представлена динамика относительной «распространенности» числа HSS, CME и SSW как среднегодовой процент времени, когда регистрируется данный тип СВ [11] и динамика среднегодовых чисел SSN.

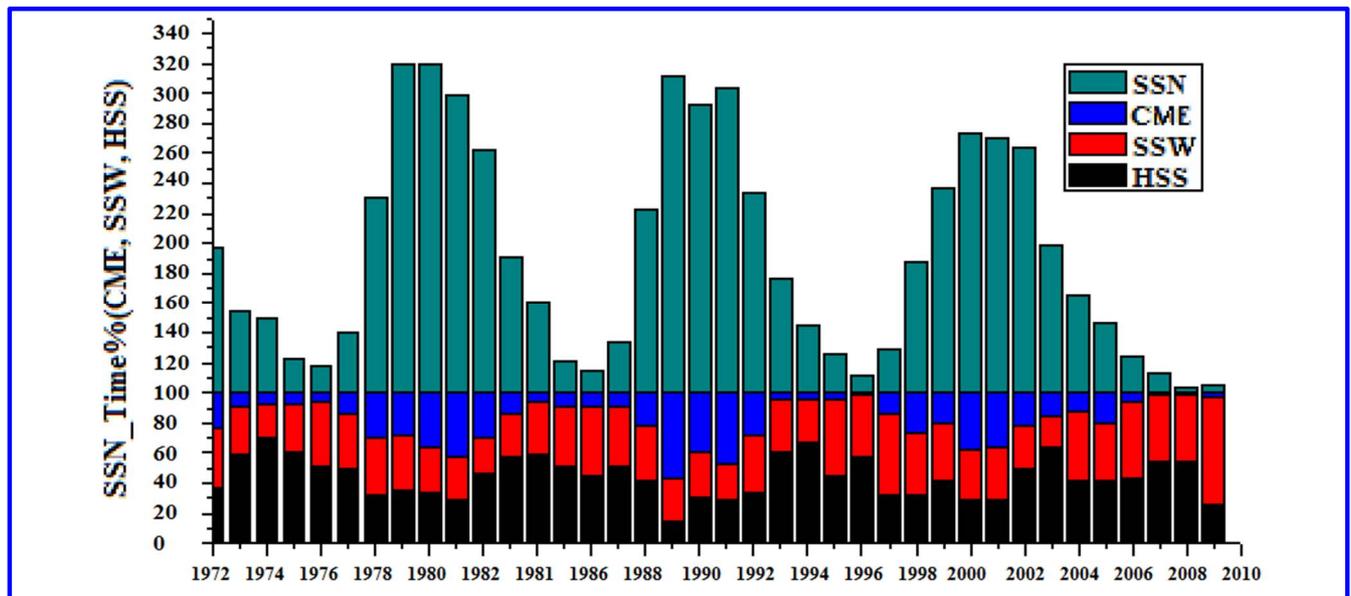


Рис. 5. Среднегодовой процент времени (в относительных единицах), который занимают CME (синий цвет), рекуррентные высокоскоростные потоки HSS (черный цвет) и медленный солнечный ветер SSW (красный цвет). Для сравнения показана динамика числа солнечных пятен (зеленый цвет). Данные для периода 1972 – 2009 гг.

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 времени для CME увеличивается, достигает максимума вблизи максимума солнечной активности и далее на фазе спада быстро уменьшается.

Межпланетная корональная масс-эжекция, коротящие области взаимодействия

Динамика геомагнитной активности при воздействии CME и HSS (динамика CME- и HSS-бурь) связана с образованием целого ряда структур, возникающих в СВ при движении в межпланетном пространстве корональных выбросов и высокоскоростных потоков [12]. Следует отметить, что вероятность образования определенного типа структуры потока солнечного ветра определяется влиянием множества факторов, в частности соотношением параметров потоков медленного ветра и параметров CME и HSS и гелиокоординатами источников CME и HSS. Динамика параметров СВ служит хорошим индикатором для идентификации магнитных бурь и для выделения отдельных структур СВ, ответственных за динамику геомагнитной активности. Временные вариации геомагнитной активности и, соответственно, вариации геомагнитных индексов и структура CME- и HSS-бурь фактически отражают временную динамику структуры потоков СВ, воздействующих на магнитосферу Земли. Область взаимодействия CME и окружающего СВ распространяется в межпланетном пространстве и вблизи Земли достигает $\sim 0,2 - 0,3 AE$ [13]. Эта область возмущенного СВ называется межпланетной корональной масс-эжекцией (ICME). Если скорость ICME превышает скорость окружающего СВ (превышает скорость быстрой моды магнитозвуковой волны) перед областью ICME образуется быстрая ударная волна (shock), между ударной волной и передним краем коронального выброса (Ejecta) формируется слой плотной горячей плазмы (Sheath). Одним из видов CME являются магнитные облака (MC, magnetic cloud – MC). Магнитные облака – это крупномасштабные структуры межпланетного магнитного поля (ММП, interplanetary magnetic field – IMF) петлеобразной формы с большим и слабо меняющимся магнитным полем, низкой плотностью и температурой ионов внутри петли.

Пример временной динамики параметров СВ для магнитной бури, формируемой при CME (CME-буря, 16 – 19 апреля 1999 г.), представлен на рис. 6 [14]. Используются следующие параметры: скорость СВ – V_{sw} , км/с; протонная плотность – N_p , n/cm^3 ; температура – T_p , К; плазменный параметр beta – отношение плазменного давления к магнитному давлению; модуль магнитного поля – B , нТл; три компоненты магнитного поля в GCM-координатах, B_x , B_y , B_z , нТл. Там же для сопоставления приведена временная динамика геомагнитных индексов (Kp -, Dst - и AE -индексов).

Можно выделить ряд характерных признаков для идентификации отдельных структур CME-бури:

– образование ударной волны (на рис. 6 отмечена прямой вертикальной линией), которая регистрируется по внезапному скачку скорости, температуры, плотности и магнитного поля;

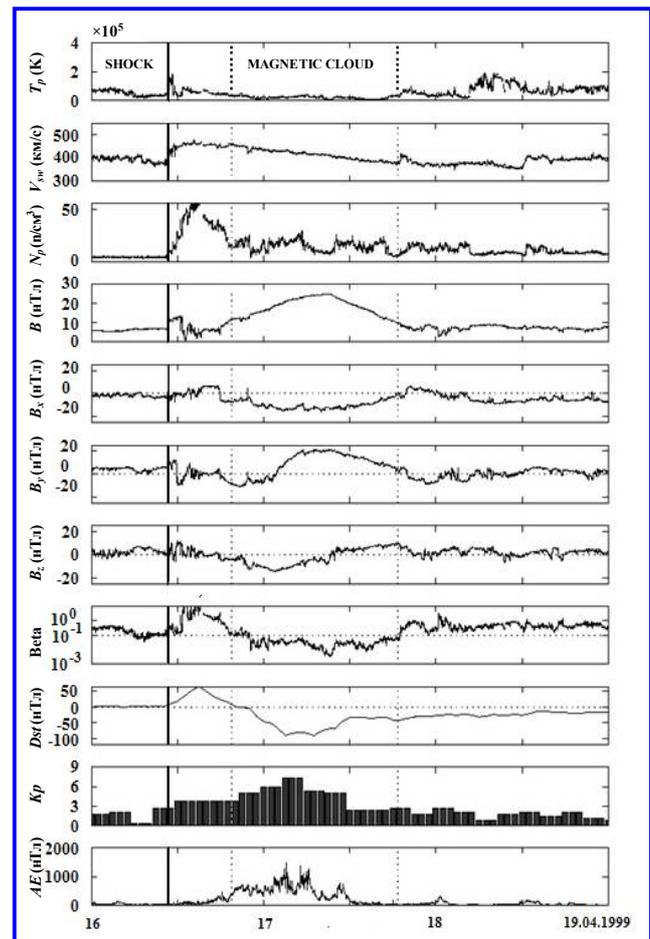


Рис. 6. Динамика параметров СВ и геомагнитных индексов при ICME для 16 – 19 апреля 1999 г. Момент наблюдения ударной волны отмечен прямой вертикальной линией, границы магнитного облака отмечены пунктирной линией

– в переходном слое между ударным фронтом и передним краем магнитного облака наблюдается значительное усиление вариаций B_y и B_z компонент магнитного поля и увеличение плотности и температуры;

– наблюдается увеличение магнитного поля, поворот вектора магнитного поля в течение $\sim 0,5$ суток на $\sim 180^\circ$ и падение температуры. Эти параметры характеризуют прохождение магнитного облака (границы магнитного облака отмечены вертикальными пунктирными линиями).

Временная динамика Kp -, Dst - и AE -индексов отражает динамику отдельных структур СМЕ-бури. На рис. 7 представлена динамика параметров СВ для СМЕ-бури 14 – 16 декабря 2006 г. по измерениям на космическом аппарате ACE [13].

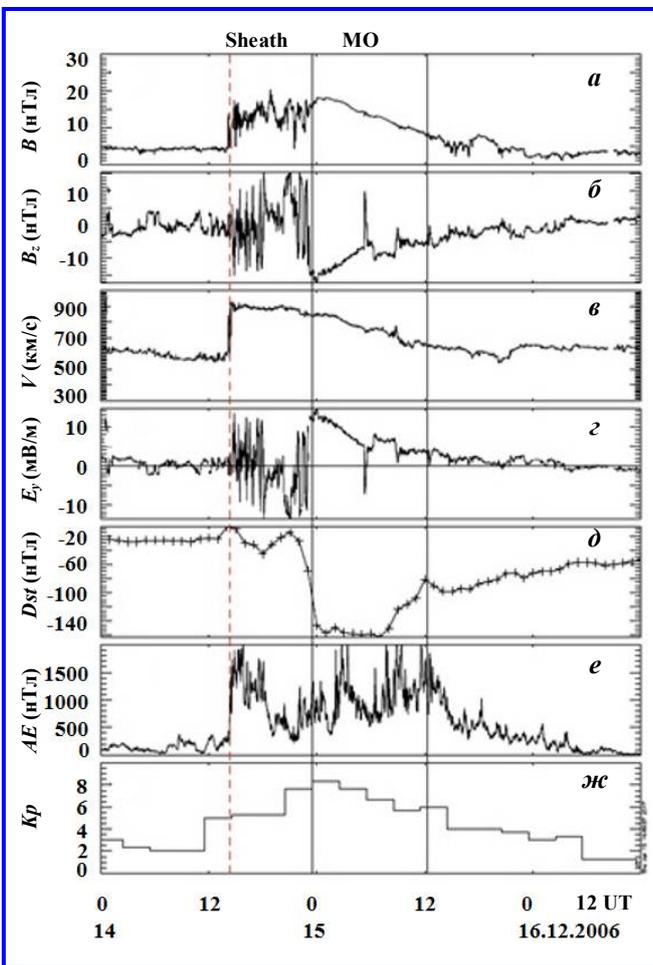


Рис. 7. Динамика параметров солнечного ветра 14 – 16 декабря 2006 г. при ICME: магнитное поле (а); B_z -компонента ММП (б); скорость (в); электрическое поле (г); для сравнения также приведены Dst - (д), AE - (е) и Kp -индексы (ж) геомагнитной активности. Момент регистрации ударной волны отмечен вертикальной пунктирной линией, прямыми линиями выделен период наблюдения магнитного облака

Использованы следующие параметры СВ: магнитное поле – B , нТл (а); B_z -компонента ММП, нТл, в GSE-системе координат (б); скорость V , км/с (в); электрическое поле $E_y = VB_z$, мВ/м (для отрицательных величин $B_z < 0$) (г); для сравнения также приведены Dst -, AE - и Kp -индексы геомагнитной активности (д, е, ж).

При распространении СМЕ в солнечном ветре образование области значительной турбулентности компонент магнитного поля во многом определяет уровень геомагнитной активности при СМЕ-бурях. Одним из характерных признаков прохождения переднего края магнитного облака является резкий спад уровня турбулентности магнитного поля, в магнитном облаке магнитное поле достаточно «гладкое», и часто в течение одного дня магнитное поле поворачивается на угол в десятки градусов. При прохождении МО регистрируются значительные изменения химического и зарядового состава плазмы СВ по сравнению с окружающим СВ.

На рис. 8 [13] представлена временная динамика магнитных и плазменных параметров для периода 2 – 8 апреля 2004 г. В этот период зарегистрировано прохождение вблизи Земли структур СВ, связанных с влиянием ICME: ударной волны и магнитного облака. Используются следующие параметры: магнитное поле (а); долготные (б) и широтные (в) углы магнитного поля в GSM-координатах; скорость солнечного ветра (г); протонная температура (черная – измеренная величина, красная – предполагаемая) (д); плазменное beta (е); отношение He/P (ж); отношение O^{+7}/O^{+6} (черн.) и Fe/O (синим) (з); средний заряд Fe (и); пичч-угловое распределение 272 эВ электронов (к).

Отметим значительное отличие структуры потоков плазмы в МО по сравнению с окружающим СВ: низкая протонная температура ~ 1 эВ; повышенная распространенность гелия – $He/p > 0,1$; высокое ионизационное состояние ионов железа – $Q_{Fe} > 12$; изменение зарядового состава ионов кислорода – $O^{+7}/O^{+6} > 1,5$; увеличение количества тяжелых ионов – $Fe/O > 0,5$. Зарядовый и элементный состав плазмы в магнитных облаках вблизи Земли фактически отражает физические условия в солнечной короне на уровне \sim нескольких солнечных радиусов.

Зарядовый и элементный состав плазмы не меняется, если временная шкала для рекомбинации частиц плазмы значительно превышает время распространения СВ к Земле (это реализуется на расстояниях нескольких солнечных радиусов, когда значительно снижается плотность плазмы). Высокие зарядовые состояния ионов формируются в отдельных областях солнечной короны с элек-

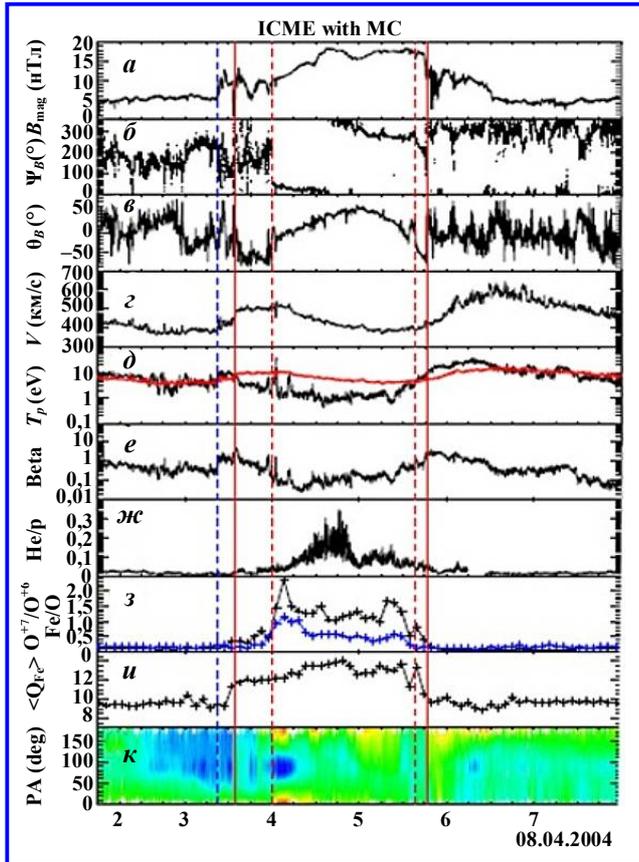


Рис. 8. Динамика параметров СВ 2 – 8 апреля 2004 г. при ICME: *a* – B_{mag} , нТл – магнитное поле; *b* и *в* – Ψ_B и Θ_B – долготные и широтные углы магнитного поля в GSM-координатах, град.; *г* – V , км/с – скорость солнечного ветра; *д* – T_p – протонная температура (черная – измеренная величина, красная – предполагаемая); *е* – плазменное beta; *ж* – отношение He/P; *з* – отношение O^{7+}/O^{6+} (черн.) и Fe/O (синим); *и* – средний заряд Fe; *к* – питч-угловое распределение 272 эВ электронов (цветом промаркирована величина потоков электронов). Цветными линиями выделены следующие структуры: пунктирная синяя линия – ударная волна; пара пунктирных красных линий – период регистрации магнитного облака; пара прямых красных линий – период регистрации ICME

тронной температурой $>2 \cdot 10^6$ К [15]. Такое нагревание солнечной короны может быть вызвано пересоединением корональных магнитных петель при CME. Исследования динамики корональных структур показывают, что магнитной энергии, реализуемой в таком процессе, достаточно, чтобы нагреть плазму CME до температур $>2 \cdot 10^6$ К.

При распространении HSS в солнечном ветре образуется область взаимодействия потоков медленно и быстро вращающегося СВ (corotating interaction region – CIR). Постепенное увеличение скорости СВ сопровождается увеличением плотности и температуры плазмы и увеличением магнитного поля, максимальные вели-

чины этих параметров, как правило, регистрируются до максимума скорости. Между потоками медленно и быстро вращающегося СВ часто регистрируется очень узкая переходная область (stream interface – SI), где плотность резко уменьшается, увеличиваются температура и скорость и изменяется направление потока СВ. Пример временной динамики параметров СВ для магнитной бури, сформированной высокоскоростным потоком СВ (HSS/CIR-бури, 27 февраля – 5 марта 1999 г.) показан на рис. 9 [14].

На рис. 10 [16] показаны вариации параметров СВ для HSS/CIR-бури, зарегистрированной 14 – 15 октября 2002 г.

Отметим основные параметры CIR, которые сформировали HSS/CIR-бури с $Dst \approx -100$ нТл (рис. 9, 10): увеличение магнитного поля до значений ≥ 15 нТл; увеличение плотности n до значений ≥ 45 см $^{-3}$; длительный период ≥ 10 ч отрицательных значений B_z -компоненты (южной) магнитного поля; в это время электрическое поле E_y было ~ 5 мВ/м.

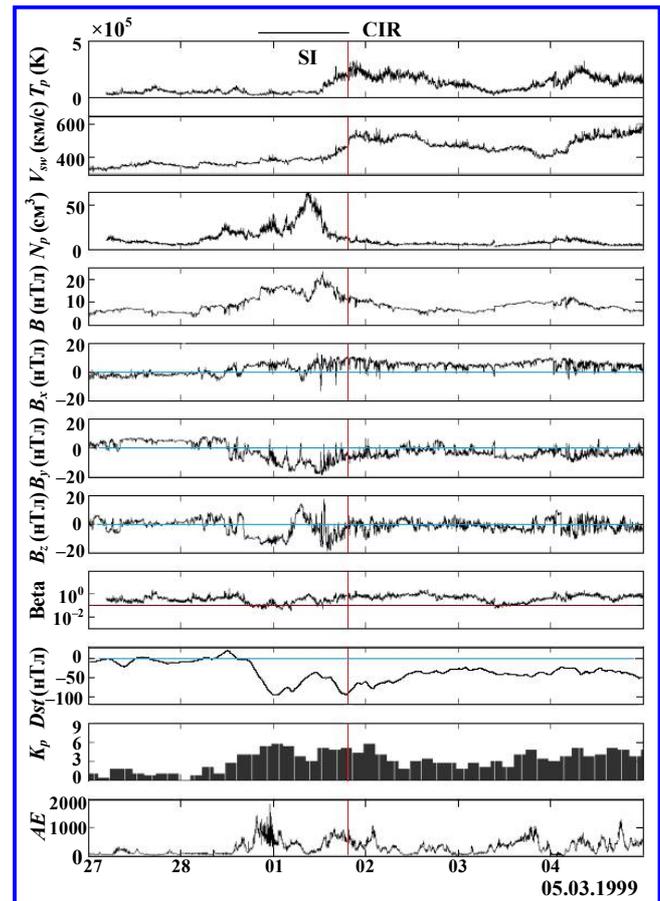


Рис. 9. Динамика параметров СВ и геомагнитных индексов 27 февраля – 5 марта 1999 г. для HSS/CIR-бури. Период наблюдения CIR отмечен прямой горизонтальной линией в верхней части рисунка, наблюдения SI отмечено вертикальной красной линией

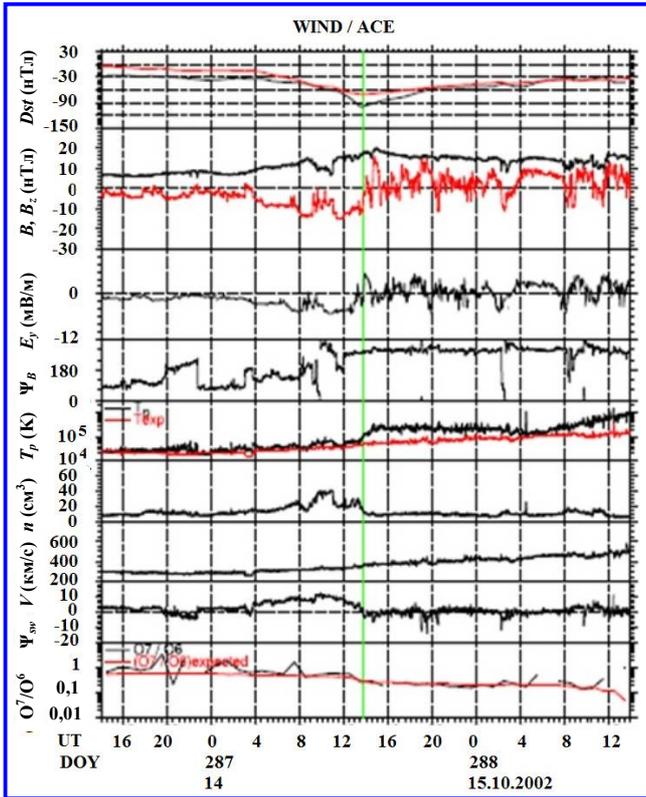


Рис. 10. Вариации параметров СВ 14 – 15 октября 2002 г. для HSS/CIR-бури. Сверху вниз: Dst -индекс; B – магнитное поле; B_z -компонента ММП (красный цвет); E_y – электрическое поле ($E_y = VB_z$); Ψ_B – долготный угол магнитного поля; T_p – температура протонов; n – плотность; V – скорость СВ; Ψ_{sw} – направление потока СВ; O^7/O^6 – отношение потоков ионов кислорода. Красным показано ожидаемое значение. Вертикальной зеленой линией отмечено время регистрации SI

Резкий спад этих параметров происходит на SI. Наличие в структурах потоков СВ отрицательной B_z -компоненты ММП повышает вероятность образования магнитной бури и увеличивает ее мощность. В спокойном СВ ММП лежит в плоскости эклиптики, значительная южная $B_z < 0$ компонента ММП появляется в возмущенном СВ, в частности, при ICME и CIR [17]. Анализ геомагнитной активности в 23 цикле солнечной активности (1996 – 2008 гг.) показал, что из 213 умеренных магнитных бурь ($50 \text{ нТл} > Dst > -100 \text{ нТл}$) с отрицательной величиной B_z 115 бурь (54%) формируются структурами CIR/HSS и 88 бурь (41%) структурами, связанными с ICME [18], при этом в 80,1% случаях (173 бури) в течение периода не менее 2 часов регистрировалось $B_z < 0$ и $E_y \geq 2 \text{ мВ/м}$.

Геомагнитные индексы

Динамика параметров СВ в структурах ICME и CIR определяет динамику и многообразие процес-

сов, возникающих в магнитосфере Земли при CME- и HSS-бурих, и, в частности, динамику вариаций магнитного поля Земли (МПЗ). Амплитуда вариаций МПЗ используется как наиболее общая характеристика интенсивности целого ряда процессов, возникающих в магнитосфере Земли при воздействии потоков солнечного ветра, и является основным параметром для описания геомагнитной активности. При анализе геомагнитной активности необходимо учитывать широтную зависимость амплитуды вариаций МПЗ (зависимость от широты места наблюдения). Динамика внутри магнитосферных процессов (вероятность возникновения, интенсивность, временные характеристики) также имеет широтную зависимость. Для описания широтных вариаций МПЗ были разработаны несколько индексов геомагнитной активности, которые дают численное описание вариаций МПЗ для разных точек поверхности Земли. Одна из первых попыток разработать численную шкалу для описания вариаций МПЗ связана с введением aa -индекса геомагнитной активности (известен с 1868 г.). В настоящее время для численного описания вариаций магнитного поля наиболее часто используются следующие индексы геомагнитной активности: Kp -индекс, ap -индекс, Ap -индекс, aa -индекс, Dst -индекс и AE -индекс. Геомагнитные индексы ap , Ap , aa , Dst и AE дают абсолютные значения вариаций магнитного поля, измеряемые в нТл. Планетарный Kp -индекс характеризует глобальную возмущенность МПЗ (магнитные бури и суббури) в трехчасовом интервале времени в условных единицах. Kp -индекс (значения известны с 1932 г.) определяется как среднее значение уровней возмущения двух горизонтальных компонент геомагнитного поля, наблюдаемых на 13-ти среднеширотных магнитных обсерваториях. Kp -индекс имеет 28 дискретных значений в диапазоне от 0 до 9 и определяется с точностью до 1/3. Индекс ap изменяется в интервале от 0 до 400 и представляет значения Kp , преобразованные к линейной шкале, в нанотеслах. Индекс ap называют планетарной амплитудой в трехчасовом интервале времени. Ap -индекс – среднесуточная величина ap -индекса. Индекс aa измеряется как средняя величина вариаций МПЗ между двумя среднеширотными станциями в южном и северном полушариях (широта $\pm 50^\circ$). Dst -индекс (известен с 1953 г.) вычисляется как средняя в часовом интервале величина возмущения горизонтальной составляющей напряженности МПЗ, отсчитывается от спокойного уровня и определяется по данным четырех низкоширотных обсерваторий, равномерно распределен-

ных по долготе. Dst -индекс обычно используется при исследовании мощных магнитосферных бурь для описания процессов формирования кольцевого тока. AE -индекс (известен с 1966 г.) характеризует суммарную магнитную возмущенность на высоких широтах, в зоне полярных сияний, обусловленную усилением токов в ионосфере, протекающих вдоль границы аврорального овала. Планетарный Kp -индекс наиболее часто используется при рассмотрении динамики геомагнитной активности. На основе динамики трехчасовых значений Kp -индекса была разработана классификация магнитных бурь (Kp -шкала): слабые бури (minor), уровень возмущенности G1, $Kp = 5$, в среднем наблюдается одна буря за 2 – 3 часа; умеренные бури (moderate), уровень G2, $Kp = 6$, в среднем одна буря в неделю; сильные бури (strong), уровень G3, $Kp = 7$, 1 буря в 2 – 3 недели; очень сильные бури (severe), одна буря в 1,5 – 2 месяца; уровень G5, $Kp > 8$, экстремальные бури (extreme), 4 – 6 раз за 11-летний цикл солнечной активности. В табл. 1 показан диапазон вариаций магнитного поля (нТл) для магнитных бурь типа G1 – G5, регистрируемых aa -, ap - и Dst -индексами.

Процесс развития геомагнитной активности для различных магнитных бурь и в течение бури может по-разному отражаться в динамике геомагнитных индексов. Это связано с тем, что каждый геомагнитный индекс отражает преимущественное влияние одной из токовых систем, возникающих при магнитосферных возмущениях. Динамика Dst -индекса в основном формируется динамикой кольцевого тока, в Kp -индекс больший вклад вносит зона авроральной активности [18]. На рис. 11 в сжатом виде [19] на примере двух CIR-событий разной

мощности, зарегистрированных в 2005 г., представлена общая картина развития геомагнитной активности, показаны временные вариации (с трехчасовым разрешением) Dst -, Ap - и AE -индексов, скорости СВ – V и параметра VB (электрическое поле в единицах нТл · км/с⁻¹, в единицах СИ это соответствует размерности $\mu V m^{-1}$); a – период DOY 93 – 99 2005 г. ($Dst = -80$ нТл); b – период 109,5 – 112 DOY 2005 г. ($Dst = -35$ нТл). Под рисунком показана цветная маркировка параметров и указана используемая масштабная сетка для создания единой Y -шкалы.

Анализ показал, что при трехчасовом разрешении Dst -, Ap - и AE -активность начинается с прибытия CIR, то есть геомагнитная активность начинается одновременно с увеличением скорости СВ [19]. При этом процесс развития геомагнитной активности по-разному отражается на динамике Dst -, Ap - и AE -индексов (временные и динамические характеристики значительно различаются). Влияние параметров СВ в структурах ICME и HSS/CIR на динамику геомагнитных индексов рассмотрено в [20]. В работе исследованы распределения 6-часовых средних величин Dst -, Ap - и AE -индексов для магнитных бурь, зарегистрированных в 23 цикле солнечной активности при воздействии ICME (63 события) и HSS/CIR (38 событий). В табл. 2 [20] представлены средние, медианные и максимальные значения для параметров СВ (магнитное поле B , скорость V , параметр VB – электрическое поле в единицах мВ/м) и для Dst -, Ap - и AE -индексов. Параметр VB характеризует общую структуру потоков СВ вблизи Земли в ICME- и HSS/CIR-бурях, часто рассматривается как основной драйвер динамики геомагнитной активности вблизи Земли.

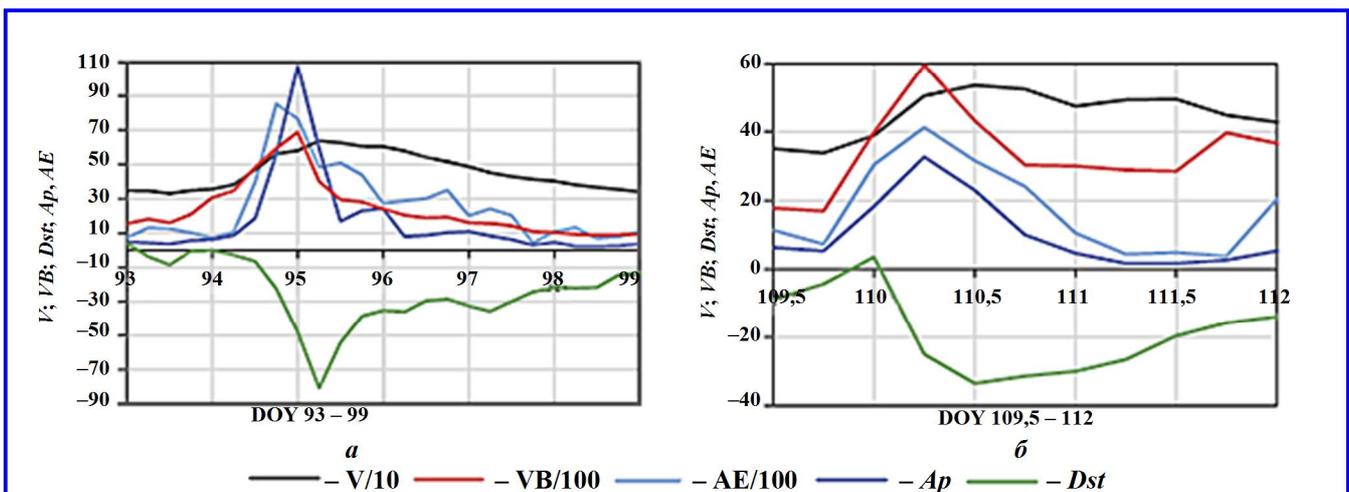


Рис. 11. Временные вариации (с трехчасовым разрешением) Dst -, Ap - и AE -индексов, скорости СВ – V и параметра VB (электрическое поле в единицах нТл·км/с) для двух CIR-событий разной мощности: a – период (дни в году) DOY 93 – 99 2005 г. ($Dst = -80$ нТл); b – период 109,5 – 112 DOY 2005 г. ($Dst = -35$ нТл)

Таблица 1

Магнитные бури	G1, Kp = 5 minor	G2, Kp = 6 moderate	G3, Kp = 7 strong	G4, Kp = 8 severe	G5, Kp > 8 extreme
ap-индекс	$32 \leq ap < 56$	$56 \leq ap < 94$	$94 \leq ap < 154$	$ap \geq 154$	
aa-индекс	$50 \leq aa < 100$	$100 \leq aa < 150$	$150 \leq aa < 200$	$200 \leq aa < 300$	$300 \geq aa$
Dst-индекс	$-30 \geq Dst > -50$	$-50 \geq Dst > -100$	$Dst \leq -100$		

Таблица 2

ICMEs							
	B (нТл)	V (км/с ⁻¹)	BV (мВ/м)	Dst (нТл)	Ap (нТл)	AE (нТл)	Reference
MAX	48	1176	45,4	-341	345	1575	
MEAN	21	634	13,5	-122	115	808	
MEDIAN	18,3	611	11,4	-121	105	778	(63 ICMEs)
HSS/CIRs							
MAX	22	742	12	-116	157	874	
MEAN	14	610	7	-52	49	573	
MEDIAN	13	614	6	-40	37	596	(38 HSS/CIRs)

Таблица 3

	Ap (ICME/ HSS-CIR)	Dst (ICME/ HSS-CIR)	AE (ICME/ HSS-CIR)
B	0,83/0,56	-0,85/-0,72	0,60/0,51
V	0,73/0,18	-0,57/-0,02	0,69/0,16
BV	0,82/0,62	-0,79/-0,67	0,65/0,58

Таблица 4

	ICMEs	HSS/CIRs
Ap - Dst	-0,92	-0,85
AE - Dst	-0,67	-0,81
AE - Ap	0,76	0,79

В 23 цикле средний суммарный вклад скорости и магнитного поля в ICME-активность был в ~2 раза выше, чем в HSS/CIR-активность (отношение величин $VB = 1,93$), при этом средние значения Dst-, Ap-индексов изменяются в ~2,3 раза и в ~1,4 раза для AE-индекса. Зависимость вариаций Dst-, Ap- и AE-индексов от вариаций скорости и магнитного поля явилась основным фактором, сформировавшим распределение величин Dst-, Ap- и AE-индексов в этих событиях. В табл. 3 [20] представлены коэффициенты корреляции Dst-, Ap- и AE-индексов для скорости V, магнитного поля B и параметра VB для ICME- и HSS/CIR-бурь. Коэффициенты корреляции для ICME- и HSS/CIR-бурь разделены косой чертой. В табл. 4 представлены взаимные коэффициенты корреляции между индексами: Ap - Dst, AE - Dst и AE - Ap для ICME- и HSS/CIR-бурь. Отметим наиболее значимые результаты:

1. Коэффициенты корреляции Dst-, Ap- и AE-индексов с параметрами V, B и VB выше у ICME-бурь, чем у HSS/CIR-бурь.

2. Коэффициенты корреляции Dst-, Ap-индексов с магнитным полем выше, чем со скоростью.

3. Для HSS/CIR-бурь Dst-индекс практически не зависит от вариаций магнитного поля.

4. Коэффициент корреляции AE - Dst у HSS/CIR-бурь выше, чем у ICME-бурь (-0,81/-0,67), что может означать большую вероятность развития кольцевого тока и аврорального электроджета при HSS/CIR-бурях. Динамика Dst-, Ap- и AE-индексов отражает развитие геомагнитной активности на разных широтах. Динамические и временные параметры геомагнитной активности зависят от геошироты: максимальная геоактивность формируется на разных геоширотах в разное время. При одинаковой величине параметра VB динамика геомагнитной активности различается при ICME- и HSS/CIR-бурях.

Геоэффективность источников геомагнитной активности

Исследование динамики геомагнитных индексов служит основой идентификации источников геомагнитной активности. На основе анализа динамики средних величин aa-индекса (период 1972 - 1986 гг.) показано [21], что вблизи максимума солнечной активности CME вкладывает ~50% в геомагнитную активность, HSS вкладывает ~33%, медленный солнечный ветер ~20%. Для минимума солнечной активности эти величины равны: ~70% для HSS, ~20% для медленного солнечного ветра и ~10% для CME. Анализ показал, что вероятность возбуждения магнитной бури заданной мощности для CME всегда выше, чем для HSS [21]. Динамика геомагнитной активности отражает динамику отдельных крупномасштабных структур СВ, сформированных при распространении в межпланетном пространстве CME и HSS. Многообразие типов источников геомагнитной активности (CIR + HSS, ICME, shock, ejecta, MO) определяет структуру и мощность

СМЕ- и HSS-бурь. Геомагнитные индексы служат индикатором определенного типа геомагнитной активности. В работе [18] для 23 цикла солнечной активности (1996 – 2008 гг.) рассматривается распределение основных источников умеренных магнитных бурь ($-50 \geq Dst > -100$) и показана их зависимость от фазы солнечного цикла. Анализ показал, что в течение 23 цикла источниками ~47,9% умеренных магнитных бурь были рекуррентные области взаимодействия CIR и высокоскоростных потоков – CIR + HSS; ~20,6% бурь вызваны ICME (межпланетная корональная масс-эжекция) и ~20,6% ударными волнами. В табл. 5 показан процент межпланетных источников для умеренных магнитных бурь – CIR+HSS, ICME и shock, для четырех периодов 23 солнечного цикла [18].

Основными источниками умеренных геомагнитных бурь на фазе роста и в максимуме солнечной активности (>50%) являются структуры, сформированные при СМЕ (ICME + shock), на фазе спада и в минимуме солнечной активности основная геомагнитная активность определяется воздействием высокоскоростных потоков СВ (CIR + HSS). Интенсивные магнитные бури ($Dst \leq -100$ нТл) формируются, в основном, при влиянии ICME (~80%) и только ~13% при CIR. Экстремальные магнитные бури ($Dst \leq 250$ нТл) формируются только при ICME [18].

Геомагнитные индексы часто используются при оценке геоэффективности отдельных структур СВ для формирования магнитной бури определенной мощности. Геоэффективность определяется как процент числа источников данного типа, которые формируют определенный тип геомагнитной активности по измерениям геомагнитных индексов, это можно рассматривать как вероятность возбуждения данным источником магнитной бури определенной мощности. Геоэффективность рекуррентных структур, сформированных при CIR (рассмотрено 727 событий за 1964 – 2003 гг.), анализируется в работе [22]. Для возбуждения умеренных магнитных бурь (moderate storm, $-50 \geq Dst > -100$) геоэффективность CIR составляет ~35%, для интенсивных магнитных бурь (strong, $Dst \leq -100$ нТл) ~2,5%. Сравнительный анализ геоэффективности отдельных структур потоков СВ, ударных волн (830 событий), рекуррентных областей взаимодействия (727 событий) и магнитных облаков (170 событий) проведен в [14]. По данным динамики Kp -индекса для возбуждения умеренных и сильных бурь (типа G2 и G3) геоэффективность равна ~65,9%, ~48,4% и ~35,3% соответственно для MO, shock и CIR. При анализе динамики Dst -индекса

для умеренных и сильных магнитных бурь эти величины составляют для MO, shock и CIR ~77,6%, ~55,4% и 32,5%, то есть из 170 магнитных облаков только 77,6% вызвали умеренные и сильные магнитные бури [14]. Анализ геоэффективности CIR, MO, sheath и ejecta для возбуждения магнитных бурь при $Dst \leq -50$ нТл проведен в работе [23]. Геоэффективность составляет ~55% для MO, ~20% для CIR, ~15% для sheath и ~8% для ejecta. Высокая геоэффективность магнитных облаков связана с генерацией отрицательной B_z -компоненты магнитного поля. Геоэффективность всех структур СВ минимальна в минимуме солнечного цикла. Результаты показывают, что геоэффективность отдельных структур СВ, сформированных СМЕ, выше, чем у структур, сформированных рекуррентными HSS. Идентификация источников геомагнитной активности, СМЕ и HSS, и анализ геоэффективности потоков СВ в структурах ICME и HSS/CIR на основе динамики геомагнитных индексов дали возможность определить условия возникновения и специфику магнитосферных процессов, возникающих в магнитосфере при ICME и HSS/CIR-бурях. Различия внутри магнитосферной системы токов, возбуждаемых в магнитосфере при воздействии СМЕ и HSS, нашли отражение в динамике процессов формирования потоков электронов внешнего радиационного пояса Земли (ВРПЗ). Анализ влияния СМЕ и CIR на формирование структуры потоков ВРПЗ проведен в работах [24, 25]. Зависимость вариаций потоков релятивистских электронов при воздействии СМЕ и CIR от энергии частиц, L -оболочки и интенсивности магнитной бури рассмотрена в [24]. Значительные отличия динамики электронов ВРПЗ регистрируются при СМЕ- и HSS-бурях даже при одинаковой мощности и времени волновой активности (chorus wave activity) [25]. В частности, при СМЕ-бурях увеличение потоков «зародышевых» электронов (~100 кэВ) начинается раньше и регистрируется на более низких L^* -оболочках, средние потоки выше, что обеспечивает далее за счет локального ускорения большие средние потоки релятивистских электронов при СМЕ. Статистический анализ последствий сильных геомагнитных возмущений показал, что СМЕ-бури наиболее опасны для наземных систем: наведенные токи могут достигать сотен ампер, что приводит к сбою работы промышленных электросетей. Возникновение поверхностных зарядов и токов, значительное увеличение потоков релятивистских электронов (наиболее опасно для геосинхронных орбит) – эти эффекты делают HSS-бури наиболее опасными для оборудования на спутниках.

Таблица 5

Период	1997 – 1999 гг. фаза роста активности	2000 – 2002 гг. максимум	2003 – 2006 гг. фаза спада активности	2003 – 2006 гг. минимум
Число бурь, $\Sigma = 213$	53	62	75	23
CIR + HSS	30,2%	33,9%	60%	82,6%
ICME	24,5%	22,6%	20%	8,7%
Shock	26,4%	30,6%	14,6%	

В заключение отметим некоторые наиболее значимые экспериментальные результаты исследования динамики геомагнитной активности.

1. Динамика геомагнитной активности формируется как отклик магнитосферных параметров на изменение структуры потоков солнечного ветра. Наиболее значительные крупномасштабные вариации геомагнитной активности (магнитные бури или штормы) связаны с влиянием корональных выбросов и высокоскоростных потоков солнечного ветра.

2. В процессе развития солнечной активности меняется годовое распределение числа CME и HSS – основных источников магнитных бурь, и соответственно меняется вклад каждой структуры в годовое распределение числа магнитных бурь, вклад в геомагнитную активность. Корональные выбросы занимают ~40 – 60 % времени вблизи солнечного максимума и почти отсутствуют (~5%) во время солнечного минимума. Высокоскоростные потоки СВ занимают ~60% времени на спадающей фазе солнечного цикла.

3. При распространении CME и HSS в межпланетном пространстве формируются области возмущенного СВ: ICME – межпланетная корональная масс-эжекция и CIR – область взаимодействия медленного и быстрого ветра.

4. На фазе роста и в максимуме солнечной активности основными источниками умеренных геомагнитных бурь (>50%) являются структуры, сформированные при CME (ICME + shock), на фазе спада и в минимуме солнечной активности структуры, сформированные при воздействии HSS (CIR + HSS). Наличие в структурах потоков СВ отрицательной B_z -компоненты межпланетного магнитного поля повышает вероятность образования магнитной бури и ее мощность.

5. Динамика индексов геомагнитной активности используется для исследования зависимости уровня геомагнитной активности от геошироты места наблюдения.

6. Статистический анализ последствий сильных геомагнитных возмущений показал, что CME-бури наиболее опасны для наземных систем: наведенные токи могут достигать сотен ампер, что приводит к сбою работы промышленных электросетей.

Возникновение поверхностных зарядов и токов, значительное увеличение потоков релятивистских электронов (наиболее опасно для геосинхронных орбит) – эти эффекты делают HSS-бури наиболее опасными для оборудования на спутниках.

Литература

- Geomagnetic storms driven by ICME- and CIR-dominated solar wind / M. H. Denton, J. E. Borovsky, R. M. Skoug [et al.] // *J. Geophys. Res.* – 2006. – Vol. 111. – № A07S07. – DOI:10.1029/2005JA011436.
- A statistical comparison of solar wind sources of moderate and intense geomagnetic storms at solar minimum and maximum / J.-C. Zhang, M. W. Liemohn, J. U. Kozyra [et al.] // *J. Geophys. Res.* – 2006. – Vol. 111. – № A01104. – DOI:10.1029/2005JA011065.
- High-Speed Solar Wind Streams during 1996 – 2007: Sources, Statistical Distribution, and Plasma/Field Properties / V. Gupta Badruddin // *Solar Phys.* – 2010. – P. 165 – 188. – DOI: 10.1007/s11207-010-9554-z.
- Equatorial coronal holes, solar wind high-speed streams, and their geoeffectiveness / G. Verbanac, B. Vršnak, A. Veronig [et al.] // *Astronomy&Astrophysics.* – 2011. – Vol. 526. – № A20. – DOI: 10.1051/0004-6361/201014617.
- Coronal Holes / S. B. Cranmer // *Living Rev. Sol. Phys.* – 2009. – Vol. 6. – P. 3. – URL: <http://www.livingreviews.org/lrsp-2009-3>.
- Coronal Mass Ejections: Observations / David F. Webb, Kenny Cottle, Timothy A. Howard // *Living Rev. Solar Phys.* – 2012. – Vol. 9. – P. 3. – URL: <http://www.livingreviews.org/lrsp-2012-3> in solar physics (дата обращения: 15.07.2019).
- Geoefficiency and energy partitioning in CIR-driven and CME-driven storms / Niescja E. Turner, W. Douglas Cramer, Susan K. Earles [et al.] // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics.* – 2009. – Vol. 71. – P. 1023 – 1031.
- Superposed epoch analysis of high-speed-stream effects at geosynchronous orbit: Hot plasma, cold plasma, and the solar wind / M. H. Denton, J. E. Borovsky // *J. Geophys. Res.* – 2008. – Vol. 113. – № A07216. – DOI:10.1029/2007JA012998.
- Differences between CME-driven storms and CIR-driven storms / J. E. Borovsky, M. H. Denton // *J. Geophys. Res.* – 2006. – Vol. 111. – № A07S08. – DOI:10.1029/2005JA011447.
- Near-earth solar wind flows and related geomagnetic activity during more than four solar cycles (1963 – 2011) / Ian G. Richardson, Hilary V. Cane // *Space Weather Space Clim.* – 2012. – Vol. 2. – № A02. – DOI: 10.1051/swsc/2012003.
- The Floor in the Solar Wind Magnetic Field Revisited / E. W. Cliver, A. G. Ling // *Solar Phys.* – 2011. – P. 285 – 301. – DOI: 10.1007/s11207-010-9657-6.

12. Variability of magnetospheric storms driven by different solar wind perturbations / K. Emilia J. Huttunen, Hannu E. J. Koskinen, Rainer Schwenn // *Journal of geophysical research*. – 2002. – Vol. 107. – № A7. – P. 1121. – DOI:10.1029/2001JA900171.
13. Coronal mass ejections and their sheath regions in interplanetary space / Emilia Kilpua, Hannu E. J. Koskinen, Tuija I. Pulkkinen // *Living Rev. Sol. Phys.* – 2017. – Vol. 14. – P. 5. – DOI: 10.1007/s41116-017-0009-6.
14. On the geomagnetic effects of solar wind interplanetary magnetic structures / E. Echer, W. D. Gonzalez, M. V. Alves // *Space Weather*. – 2006. – Vol. 4. – № S06001. – DOI:10.1029/2005SW000200.
15. Ionization state and magnetic topology of coronal mass ejections / T. Henke, J. Woch, R. Schwenn [et al.] // *J. Geophys. Res.* – 2001. – Vol. 106. – P. 10597 – 10614. – DOI: 10.1029/2000JA900176.
16. Major geomagnetic storms ($Dst \leq 100$ nT) generated by corotating interaction regions / I. G. Richardson, D. F. Webb, J. Zhang [et al.] // *J. Geophys. Res.* – 2006. – Vol. 111. – № A07S09. – DOI:10.1029/2005JA011476.
17. Energy coupling between the solar wind and the Magnetosphere / S.-I. Akasofu // *Space Sci. Rev.* – 1981. – Vol. 28. – P. 121 – 190.
18. Interplanetary origins of moderate ($-100 \text{ nT} < Dst \leq -50 \text{ nT}$) geomagnetic storms during solar cycle 23 (1996 – 2008) / E. Echer, B. T. Tsurutani, W. D. Gonzalez // *J. Geophys. Res. Space Physics*. – 2013. – Vol. 118. – P. 385 – 392. – DOI: 10.1029/2012JA018086.
19. Geomagnetic Effects of Corotating Interaction Regions / Bojan Vršnak, Mateja Dumbovic, Jaša Calogovic [et al.] // *Solar Phys.* – 2017. – Vol. 292. – P. 140. – DOI 10.1007/s11207-017-1165-5.
20. Comparison of geoeffectiveness of coronal mass ejections and corotating interaction regions / G. Verbanac, S. Živković, B. Vršnak [et al.] // *Astronomy&Astrophysics*. – 2013. – Vol. 558. – DOI: 10.1051/0004-6361/201220417.
21. Sources of geomagnetic activity over the solar cycle: Relative importance of coronal mass ejections, high-speed streams, and slow solar wind / I. G. Richardson, E. W. Cliver, H. V. Cane // *J. Geophys. Res.* – 2000. – Vol. 105. – № A8. – P. 18203 – 18213. – DOI: 10.1029/1999JA000400.
22. Geoeffectiveness of corotating interaction regions as measured by *Dst*-index / M. V. Alves, E. Echer, W. D. Gonzalez // *J. Geophys. Res.* – 2006. – Vol. 111. – № A7. – DOI: 10.1029/2005JA011379.
23. Geoeffectiveness and efficiency of CIR, sheath, and ICME in generation of magnetic storms / Y. I. Yermolaev, N. S. Nikolaeva, I. G. Lodkina [et al.] // *J. Geophys. Res.* – 2012. – Vol. 117. – № A00L07. – DOI:10.1029/2011JA017139.
24. Variations of the Electron Fluxes in the Terrestrial Radiation Belts Due To the Impact of Corotating Interaction Regions and Interplanetary Coronal Mass Ejections / R. Benacquista, D. Boscher, S. Rochel [et al.] // *J. Geophys. Res.* – 2018. – Vol. 123. – № 2. – DOI: 10.1002/2017JA024796.
25. The Outer Radiation Belt Response to the Storm Time Development of Seed Electrons and Chorus Wave Activity During CME and CIR Driven Storms / S. T. Bingham, C. G. Mouikis, L. M. Kistler [et al.] // *J. Geophys. Res.* – 2018. – Vol. 123. – № 12. – DOI: 10.1029/2018JA025963.

Поступила в редакцию 25.06.2019

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. I. GEOMAGNETIC ACTIVITY SOURCES, CORONAL MASS EJECTION, HIGH-SPEED SOLAR WIND STREAMS

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

The presented review 'Solar and geomagnetic activity dynamics' contains the analysis of modern perceptions of relations between the geomagnetic activity and dynamic processes in the solar corona. The relations between the geomagnetic activity and solar processes were revealed in the mid-XIX century. The correlation of the number of solar bursts with the number of geomagnetic disturbances, as well as with

the number and brightness of aurorae was analyzed by Carrington in 1860, and 11-year periodicity in dynamics of the number of sunspots and dynamics of geomagnetic disturbances and aurorae was discovered. The geomagnetic activity is generated as a response of magnetosphere processes to the change of the structure of solar wind streams, i.e. it actually reflects the changes of the solar corona structure in the process of solar activity development. The most significant large-scale variations of geomagnetic activity (magnetic disturbances or storms) are related to the influence of coronal ejections and high-speed solar wind streams. Magnetic storms are effective drivers of a number of magnetosphere processes, the dynamics of which considerably determines the possibility of using the near-Earth space by the modern hi-tech society. The study of geomagnetic activity dynamics is closely related to the necessity of resolving a number of technical problems that arise during the operation of industrial power supply systems, satellites and communication systems (GPS-navigation, shortwave communication).

The first part of review 'Geomagnetic activity sources, coronal mass ejection (CME), high-speed solar wind streams (HSS)' deals with the basic issues related to the impact of changes in the structure of solar wind streams under the influence of CME and HSS on geomagnetic activity. Particularly, the specific differences of dynamics of solar wind parameters in the CME and HSS structures are demonstrated. In the process of solar activity development, the annual distribution of the number of CME and HSS (main sources of magnetic storms) changes, and, respectively, the contribution of each structure to the annual distribution of the number of geomagnetic storms and to the geomagnetic activity also changes. Dynamics of geomagnetic activity under the influence of CME and HSS (dynamics of CME- and HSS-storms) is related to formation of a number of structures that arise in the solar wind during the motion of coronal ejections and high-speed streams in the interplanetary space. The area of interaction of a coronal ejection and surrounding solar wind expands in the interplanetary space and reaches $\sim 0.2 - 0.3$ AE near the Earth. This area of perturbed solar wind is called Interplanetary Coronal Mass Ejection (ICME). In front of the ICME area, a number of perturbed solar wind structures arise: fast shock wave, a hot dense plasma sheath is formed between the shock wave and leading edge of the coronal ejection. One of the CME types is represented by magnetic clouds (MC). During the expansion of HSS, an area of interaction between the low-speed and high-speed solar wind streams (Corotating Interaction Region (CIR)) is formed in the solar wind. The gradual increase of the solar wind speed is accompanied by the plasma temperature and density rising, as well as increase of magnetic field; the maximum values of these parameters are generally recorded up to the speed maximum. The main drivers of geomagnetic activity dynamics are the structures of the solar wind streams, which have been formed near the Earth during the expansion of CME and HSS: these are shock, plasma sheath, ejecta for CME storms and CIR, and HSS for HSS storms. In the growth phase and at the maximum of solar activity, the main sources of moderate geomagnetic storms ($>50\%$) are the structures formed at CME (ICME + shock); in the decay phase and at the minimum of solar activity, the main sources of moderate geomagnetic storms are the structures formed under the influence of HSS (CIR + HSS). The presence of a negative B_z component of the interplanetary magnetic field (IMF) in the structures of the solar wind streams increases the probability of formation of a magnetic storm and augmentation of its power. The review uses the experimental data on dynamics of parameters of the solar wind and interplanetary magnetic field in the ICME and CIR structures.

Key words: sources of geomagnetic activity, coronal mass ejection, high-speed solar wind streams, interaction between low-speed and high-speed solar wind streams, magnetic clouds.

References

1. Geomagnetic storms driven by ICME- and CIR-dominated solar wind / M. H. Denton, J. E. Borovsky, R. M. Skoug [et al.] // J. Geophys. Res. – 2006. – Vol. 111. – № A07S07. – DOI:10.1029/2005JA011436.
2. A statistical comparison of solar wind sources of moderate and intense geomagnetic storms at solar minimum and maximum / J.-C. Zhang, M. W. Liemohn, J. U. Kozyra [et al.] // J. Geophys. Res. – 2006. – Vol. 111. – № A01104. – DOI:10.1029/2005JA011065.
3. High-Speed Solar Wind Streams during 1996 – 2007: Sources, Statistical Distribution, and Plasma/Field Properties / V. Gupta Badruddin // Solar Phys. – 2010. – P. 165 – 188. – DOI: 10.1007/s11207-010-9554-z.
4. Equatorial coronal holes, solar wind high-speed streams, and their geoeffectiveness / G. Verbanac, B. Vršnak, A. Veronig [et al.] // Astronomy&Astrophysics. – 2011. – Vol. 526. – № A20. – DOI: 10.1051/0004-6361/201014617.
5. Coronal Holes / S. B. Cranmer // Living Rev. Sol. Phys. – 2009. – Vol. 6. – P. 3. – URL: <http://www.livingreviews.org/lrsp-2009-3>.
6. Coronal Mass Ejections: Observations / David F. Webb, Kenny Cottle, Timothy A. Howard // Living Rev. Solar Phys. – 2012. – Vol. 9. – P. 3. – URL: <http://www.livingreviews.org/lrsp-2012-3> in solar physics (дата обращения: 15.07.2019).
7. Geoefficiency and energy partitioning in CIR-driven and CME-driven storms / Niescja E. Turner, W. Douglas Cramer, Susan K. Earles [et al.] // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. – 2009. – Vol. 71. – P. 1023 – 1031.
8. Superposed epoch analysis of high-speed-stream effects at geosynchronous orbit: Hot plasma, cold plasma, and the solar wind / M. H. Denton, J. E. Borovsky // J. Geophys. Res. – 2008. – Vol. 113. – № A07216. – DOI:10.1029/2007JA012998.
9. Differences between CME-driven storms and CIR-driven storms / J. E. Borovsky, M. H. Denton // J. Geophys. Res. – 2006. – Vol. 111. – № A07S08. – DOI:10.1029/2005JA011447.
10. Near-earth solar wind flows and related geomagnetic activity during more than four solar cycles (1963 – 2011) / Ian G. Richardson, Hilary V. Cane // Space Weather Space Clim. – 2012. – Vol. 2. – № A02. – DOI: 10.1051/swsc/2012003.
11. The Floor in the Solar Wind Magnetic Field Revisited / E. W. Cliver, A. G. Ling // Solar Phys. – 2011. – P. 285 – 301. – DOI: 10.1007/s11207-010-9657-6.
12. Variability of magnetospheric storms driven by different solar wind perturbations / K. Emilia J. Huttunen, Hannu E. J. Koskinen, Rainer Schwenn // Journal of geophysical research. – 2002. – Vol. 107. – № A7. – P. 1121. – DOI:10.1029/2001JA900171.
13. Coronal mass ejections and their sheath regions in interplanetary space / Emilia Kilpua, Hannu E. J. Koskinen, Tuija I. Pulkkinen // Living Rev. Sol. Phys. – 2017. – Vol. 14. – P. 5. – DOI: 10.1007/s41116-017-0009-6.
14. On the geomagnetic effects of solar wind interplanetary magnetic structures / E. Echer, W. D. Gonzalez, M. V. Alves // Space Weather. – 2006. – Vol. 4. – № S06001. – DOI:10.1029/2005SW000200.
15. Ionization state and magnetic topology of coronal mass ejections / T. Henke, J. Woch, R. Schwenn [et al.] // J. Geophys. Res. – 2001. – Vol. 106. – P. 10597 – 10614. – DOI: 10.1029/2000JA900176.

16. Major geomagnetic storms ($Dst \leq 100$ nT) generated by corotating interaction regions / I. G. Richardson, D. F. Webb, J. Zhang [et al.] // J. Geophys. Res. – 2006. – Vol. 111. – № A07S09. – DOI:10.1029/2005JA011476.
17. Energy coupling between the solar wind and the Magnetosphere / S.-I. Akasofu // Space Sci. Rev. – 1981. – Vol. 28. – P. 121 – 190.
18. Interplanetary origins of moderate (-100 nT $< Dst \leq -50$ nT) geomagnetic storms during solar cycle 23 (1996 – 2008) / E. Echer, B. T. Tsurutani, W. D. Gonzalez // J. Geophys. Res. Space Physics. – 2013. – Vol. 118. – P. 385 – 392. – DOI: 10.1029/2012JA018086.
19. Geomagnetic Effects of Corotating Interaction Regions / Bojan Vršnak, Mateja Dumbovic, Jaša Calogovic [et al.] // Solar Phys. – 2017. – Vol. 292. – P. 140. – DOI 10.1007/s11207-017-1165-5.
20. Comparison of geoeffectiveness of coronal mass ejections and corotating interaction regions / G. Verbanac, S. Živković, B. Vršnak [et al.] // Astronomy&Astrophysics. – 2013. – Vol. 558. – DOI: 10.1051/0004-6361/201220417.
21. Sources of geomagnetic activity over the solar cycle: Relative importance of coronal mass ejections, high-speed streams, and slow solar wind / I. G. Richardson, E. W. Cliver, H. V. Cane // J. Geophys. Res. – 2000. – Vol. 105. – № A8. – P. 18203 – 18213. – DOI: 10.1029/1999JA000400.
22. Geoeffectiveness of corotating interaction regions as measured by Dst -index / M. V. Alves, E. Echer, W. D. Gonzalez // J. Geophys. Res. – 2006. – Vol. 111. – № A7. – DOI: 10.1029/2005JA011379.
23. Geoeffectiveness and efficiency of CIR, sheath, and ICME in generation of magnetic storms / Y. I. Yermolaev, N. S. Nikolaeva, I. G. Lodkina [et al.] // J. Geophys. Res. – 2012. – Vol. 117. – № A00L07. – DOI:10.1029/2011JA017139.
24. Variations of the Electron Fluxes in the Terrestrial Radiation Belts Due To the Impact of Corotating Interaction Regions and Interplanetary Coronal Mass Ejections / R. Benacquista, D. Boscher, S. Rochel [et al.] // J. Geophys. Res. – 2018. – Vol. 123. – № 2. – DOI: 10.1002/2017JA024796.
25. The Outer Radiation Belt Response to the Storm Time Development of Seed Electrons and Chorus Wave Activity During CME and CIR Driven Storms / S. T. Bingham, C. G. Mouikis, L. M. Kistler [et al.] // J. Geophys. Res. – 2018. – Vol. 123. – № 12. – DOI: 10.1029/2018JA025963

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 «VNIEM 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 «VNIEM Corporation»).