

СТАТИСТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МЕЖПЛАНЕТНЫХ УСЛОВИЙ НА ГЕОМАГНИТНЫЕ БУРИ. 2. ВАРИАЦИИ ПАРАМЕТРОВ

© 2011 г. Ю. И. Ермолаев, И. Г. Лодкина, Н. С. Николаева, М. Ю. Ермолаев

Институт космических исследований РАН, г. Москва

yermol@iki.rssi.ru

Поступила в редакцию 27.01.2010 г.

Исследуется поведение средних значений параметров солнечного ветра и межпланетного магнитного поля (ММП) и их абсолютных и относительных вариаций во время магнитных бурь, генерированных различными типами солнечного ветра. В настоящей статье, которая является продолжением работы [1], мы на основе архива данных OMNI для периода 1976–2000 годов выполнили анализ 798 геомагнитных бурь с $D_{st} \leq -50$ нТл и их межпланетных источников: короткопродолжительных областей взаимодействия CIR, областей сжатия Sheath перед межпланетными СМЕ; магнитных облаков MC; “поршней” Ejecta, и неопределенного типа источника. Для анализа был использован двойной метод наложенных эпох, в котором за опорные времена взяты моменты начала магнитной бури и минимума D_{st} индекса. Показано, что совокупность межпланетных источников магнитных бурь по своим медленно и быстро изменяющимся характеристикам разбивается на две основные группы: (1) ICME (MC и Ejecta) (2) CIR и Sheath. Средние значения, абсолютные и относительные вариации в MC и Ejecta для всех параметров оказываются или средними, или ниже среднего (средние значения электрического поля E_y и B_z компоненты ММП по модулю выше), а в CIR и Sheath – выше среднего. Высокие значения относительной вариации концентрации $sN/\langle N \rangle$ наблюдаются в MC. В то же время высокие значения для относительных вариаций скорости, B_z компоненты и модуля ММП наблюдаются в Sheath и CIR. Заметных различий в соотношениях рассматриваемых параметров для средних и сильных магнитных бурь не наблюдается.

1. ВВЕДЕНИЕ

Настоящая работа посвящена продолжению изучения механизмов передачи энергии от солнечного ветра внутрь магнитосферы и возбуждения геомагнитных бурь. В нашей предыдущей работе [1] мы на основе нашего “Каталога крупномасштабных типов солнечного ветра в 1976–2000 годы” [2] выполнили анализ межпланетных источников 798 магнитных бурь с $D_{st} \leq -50$ нТл на основе архива данных OMNI для периода 1976–2000 годов. В качестве источников бурь были рассмотрены следующие крупномасштабные типы солнечного ветра: 145 магнитных бурь были вызваны событиями CIR, 96 магнитных бурь – Sheath (12 магнитных бурь генерированы областью Sheath перед MC, ShMC, и 84 магнитные бури – областью Sheath перед Ejecta, ShE); 62 магнитные бури связаны с магнитными облаками MC (причем 50 бурь вызваны MC с Sheath и 12 MC без Sheath); 161 магнитная буря связана с событиями Ejecta (115 – Ejecta с Sheath, 46 – Ejecta без Sheath), источник остальных 334 магнитных бурь (т.е. 42% из 798 бурь) оказался неопределенным, главным образом из-за отсутствия в базе данных OMNI полного набора измерений для отдельных интервалов времени. В отличие от наших предыдущих исследований [3–5], в которых мы использовали метод наложенных эпох с (МНЭ) опорным временем (временем эпохи) в начале бури (в онсете)

или в минимуме D_{st} индекса, в указанной работе [1] для анализа был использован двойной метод наложенных эпох (ДМНЭ), в котором за опорные времена были одновременно взяты оба момента времени: моменты начала магнитной бури и минимума D_{st} индекса, а длительности главных фаз всех магнитных бурь были изменены таким образом, чтобы они стали равными. Это позволило исследовать динамику параметров для бурь с разной длительностью главной фазы. С помощью этого метода было проанализировано временное поведение ряда параметров солнечного ветра, межпланетного магнитного поля (ММП) и магнитосферных индексов на главной фазе магнитной бури, причем отдельно для разных крупномасштабных типов солнечного ветра.

Во многих работах отмечалось, что солнечный ветер носит принципиально турбулентный характер (см., например, материалы международной конференции “Солнечный ветер 12” в 2009 году [6]), и поэтому его турбулентность оказывает влияние на процессы генерации магнитосферных возмущений (см., например, обзоры и недавние работы [7–14], и ссылки в них). Например, Borovsky and Funsten в своей работе [10] показали, что уровень возмущенности магнитосферы, описываемый различными магнитосферными индексами, возрастает при возрастании уровня флуктуаций величины и компонент ММП, причем как при наличии южной,

так и северной компоненты ММП. В ряде работ (см., например, недавние работы [11, 13–17] и ссылки в них) было показано, что на развитие магнитной бури помимо величины (или медленных изменений) различных параметров могут оказывать влияния также и быстрые вариации этих параметров.

Однако эти исследования имели отдельные недостатки. Во-первых, исследовались вариации в основном модуля и компонент ММП без анализа влияния вариаций других параметров. Во-вторых, не учитывались особенности различных типов солнечного ветра, так как анализ проводился без селекции данных по таким типам.

Некоторые из этих недостатков мы пытались преодолеть в нашей предыдущей работе [4], в которой мы исследовали методом наложенных эпох (с началом эпохи в онсете магнитной бури) вариации (1-часовые дисперсии) скорости, температуры, плотности и модуля ММП для магнитных бурь, генерированных CIR, Sheath и ICME. В отличие от предыдущей статьи [4], в настоящей работе мы

1 – используем более развитую классификацию типов солнечного ветра, включающую 2 подтипа ICME: MC и Ejecta;

2 – анализируем данные по двойному методу наложенных эпох, как в предыдущей статье [1];

3 – исследуем вариации 12 параметров солнечного ветра и ММП;

4 – раздельно анализируются условия для умеренных и сильных бурь;

5 – анализируем не только абсолютные значения вариаций, но и относительные (отнесенные к средним значениям соответствующего параметра) значения.

В качестве исходных данных в настоящей статье используется временной ход среднечасовых дисперсий, содержащихся в базе данных OMNI за 1976–2000 гг. [18].

2. МЕТОДИКА

Методика идентификации крупномасштабных типов солнечного ветра подробно описана в нашей работе [2] и состоит в сравнении каждой точки базы данных OMNI с набором пороговых критериев по ключевым параметрам солнечного ветра и ММП. Предполагается, что событие солнечного ветра приводит к магнитной буре, если минимум D_{st} попадает внутрь интервала события или следует за ним в течение не более 2-х часов.

Данные для интервалов, отсеleetированных по типам солнечного ветра, обрабатывались методом наложенных эпох с двумя контрольными временами (см. подробнее в статье [1]): время начала магнитной бури (время “0”) и время минимума D_{st} индекса (время “6”). Интервал от времени “0” до “6” содержит искусственно измененные длительности

событий, поэтому, чтобы эти времена отличались от реально измеренного времени, мы даем их в кавычках. В качестве “начала” магнитной бури бралась первая 1-часовая точка резкого уменьшения D_{st} индекса [3–5]. Для всех событий (интервалов) временная шкала между этими временами разделялась на 5 подинтервалов с равной относительной длительностью, и данные, попавшие в один подинтервал, усреднялись в соответствии с числом точек, попавших в данный подинтервал (их число может быть разным в разных подинтервалах). Данная процедура означает, что для реальных данных временная шкала в диапазоне между точками “0” и “6” менялась линейным образом, но это изменение было небольшим (для 2/3 событий длительность изменилась не более чем на 1/3), так как длительность главной фазы бури в среднем составляет 7 ± 4 часа [2–5]. Временная шкала до времени “0” и после времени “6” осталась без изменений, и в этих интервалах время указывается без кавычек. Преимуществом данного метода является возможность сравнения динамики межпланетных и магнитосферных параметров во время главной фазы магнитных бурь, имеющих разную длительность.

В соответствии с МНЭ данные обрабатывались в интервалах от –12 до “0” и от “6” до +24 часов, при этом учитывалась длительность каждого интервала данного типа солнечного ветра. Согласно нашим результатам длительности различных типов солнечного ветра для интервала 1976–2000 годы составили: 20.6 ± 12.2 часов для CIR, 29.8 ± 20.5 для Ejecta, 28.2 ± 13.4 для MC и 15.7 ± 10.1 для Sheath [2] и близки к средним длительностям этих типов солнечного ветра, приведших к магнитным бурям [3–5, 19]. Поэтому число точек в интервалах усреднения заметно падает (соответственно, ошибка возрастает) к концам выбранного интервала от –12 до +24, особенно для Sheath.

Единственным принципиальным отличием настоящей статьи от предыдущей [1] является то, что в данной работе проводится анализ не самих параметров плазмы и ММП, а их вариаций (среднечасовых дисперсий), взятых из базы данных OMNI и обозначаемых здесь со знаком s , т.е. sV для скорости, sT для температуры, sN для концентрации и т.д. Так как дисперсия для части параметров не содержится в базе OMNI, то для них мы были вынуждены для каждого часа i рассчитать вариации исходя из вариаций параметров, входящих в формулы их расчета и содержащиеся в базе OMNI:

$$[s(T/T_{\text{exp}})]_i = (T/T_{\text{exp}})_i \{ [(sT)_i/T_i]^2 + [2(sV)_i/V_i]^2 \}^{1/2}$$

для отношения измеренной температуры протонов к температуре, оцененной по величине скорости,

$$(sP_d)_i = (P_d)_i \{ [(sN)_i/N_i]^2 + [2(sV)_i/V_i]^2 \}^{1/2}$$

для кинетического давления,

$$(sP)_i = (P)_i \{ [(sN)_i/N_i]^2 + [(sT)_i/T_i]^2 \}^{1/2}$$

для теплового давления,

$(s\beta)_i = \beta_i \{ [(sN)_i/N_i]^2 + [(sT)_i/T_i]^2 + [2(sB)_i/B_i]^2 \}^{1/2}$ для отношения теплового давления к магнитному и $(sE_y)_i = (E_y)_i \{ [(sV)_i/V_i]^2 + [(sB_z)_i/(B_z)_i]^2 \}^{1/2}$ для компоненты электрического поля. Далее вариации параметров из базы OMNI и эти рассчитанные вариации обрабатывались по двойному методу наложенных эпох. Полученные результаты представлялись в двух видах: в виде вариаций параметров (дисперсий) и в виде относительных вариаций (вариации, деленные на средние значения параметров для данного типа солнечного ветра).

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

Рис. 1 в сжатом виде показывает результаты, более подробно обсуждаемые в предыдущей работе [1], и представляет средние значения ряда параметров солнечного ветра и ММП (левая колонка: V — скорость, T и T/T_{exp} — измеренная температура протонов и температура, отнесенная к температуре, рассчитанной по средней зависимости температуры от скорости [20], E_y — компонента электрического поля, B_z — компонента магнитного поля, β — отношение теплового давления к магнитному, правая колонка: N — концентрация, P_d и P_t — динамическое и тепловое давление солнечного ветра, B_x , B_y и B — компоненты и модуль ММП) и магнитосферных индексов D_{st} и K_p . Разные линии на рисунках означают разные типы солнечного ветра: (MC+Ejecta), MC и Ejecta, Sheath, CIR и IND (неопределенный тип). Обозначения типов солнечного ветра приведены внизу рисунка вместе с указанием статистики (эта статистика соответствует числу событий, число точек в отдельных интервалах может отличаться от этого числа).

Приведенные на рис. 1 данные показывают, что: (1) независимо от типа солнечного ветра магнитная буря начинается через 1–2 часа после поворота ММП к югу и заканчивается через 1–2 часа после резкого уменьшения южной компоненты ММП; (2) магнитные бури при Sheath и CIR развиваются, как правило, при более высоких скорости, температуре, модуле ММП, динамическом и тепловом давлении и β -параметре; (3) Sheath оказывается наиболее эффективной межпланетной причиной бурь из всех типов.

На рис. 2 показаны вариации тех же параметров солнечного ветра и ММП, что и на рис. 1. Временной ход средних значений магнитосферных индексов D_{st} и K_p взят без изменений из рис. 1. Вариации выше в Sheath и CIR для тех же параметров, для которых выше средние значения, за исключением β -параметра. В этих типах солнечного ветра также выше вариации всех компонент ММП, включая B_z .

На рис. 3 показаны относительные (т.е. нормированные на средние значения в данном интервале

усреднения для того же типа солнечного ветра) вариации тех же параметров, что и на рис. 2. Необходимо отметить, что некоторые относительные вариации превышают 1000%, так как средние величины близки к нулю, и такие параметры (β -параметр, компоненты ММП, тепловое давление) нужно анализировать с осторожностью. Рис. 3 показывает, что относительные вариации для всех типов течений очень близки между собой, и только относительный вариации модуля ММП и величины скорости sV/V 1.5 раза выше в Sheath и CIR. Нужно отметить, что вариации наиболее геоэффективных межпланетных параметров sB_z и sE_y оказываются минимальными на главной фазе бури для всех типов солнечного ветра.

Средние значения обсуждаемых выше параметров, их абсолютные и относительные вариации отдельно для умеренных ($-100 < D_{st} \leq -50$ нТ) и сильных ($D_{st} \leq -100$ нТ) магнитных бурь показаны, соответственно, на рис. 4 и 7, 5 и 8, 6 и 9. Так же, как на рис. 1–3, на этих рисунках внизу в скобках возле линий для соответствующего типа солнечного ветра указана статистика (число событий). Более высокая величина разброса параметров на рис. 7–9 (для сильных магнитных бурь с $D_{st} \leq -100$ нТ) связана, в основном, с более низкой статистикой, чем на предыдущих рисунках (рис. 1–6). За исключением разных значений южной компоненты ММП и электрического поля E_y , все параметры и их вариации для умеренных и сильных магнитных бурь качественно и количественно ведут себя похожим образом. Более подробно сравнение проводится в следующем разделе статьи.

4. ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Таким образом, в настоящей работе двойным методом наложенных эпох (аналогичным использованному в работе [1]) проанализировано поведение средних значений параметров и их абсолютных и относительных вариаций на главной фазе магнитных бурь, генерированных разными крупномасштабными типами солнечного ветра, и показано на рис. 1–3, 4–6 и 7–9, соответственно, для “всех” ($D_{st} \leq -50$ нТ), умеренных ($-100 < D_{st} \leq -50$ нТ) и сильных ($D_{st} \leq -100$ нТ) магнитных бурь. Данные, представленные на главной фазе (время “0”–“6”) этих рисунков суммированы в таблице. В таблице для различных типов солнечного ветра (по горизонтали) и различных параметров (по вертикали) буквами “н”, “с” и “в” качественно показано поведение (уровень) соответствующего параметра относительно поведения других типов солнечного ветра, т.е. низкое (ниже среднего), среднее (около среднего положения) и высокое (выше среднего), соответственно. Для каждого типа солнечного ветра представлены средние значения, абсолютные и относительные вариации (соответствующие колонки

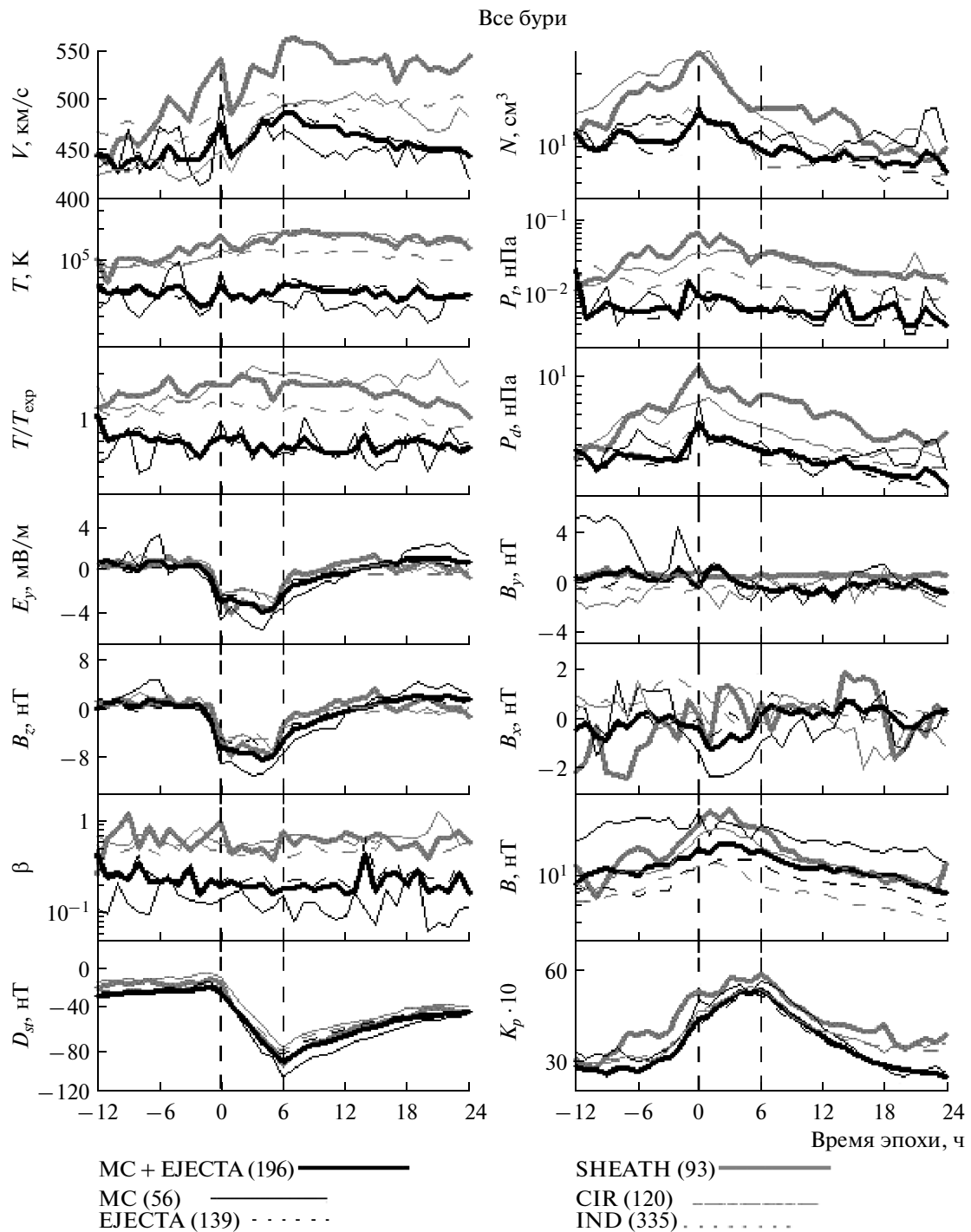


Рис. 1. Временной ход средних значений 12 параметров солнечного ветра и ММП и 2 магнитосферных индексов, полученный по двойному методу наложения эпох для всех бурь с $D_{st} \leq -50$ нТ.

отмечены значками \diamond , s и s/\diamond , причем все данные о средних, вариациях и относительных вариациях разделены на “все”, умеренные и сильные бури, которые представлены в 3 соседних колонках, соответственно. Так как рис. 1, 4 и 7 представляют в более сжатом виде, чем в оригинале, информацию

работы [1], таблица в колонках, отмеченных значком \diamond , суммирует и результаты указанной работы.

Прежде, чем начать обсуждать полученные результаты, следует напомнить следующее.

1. Среднечасовые дисперсии параметров базы OMNI, используемые нами в качестве вариаций,

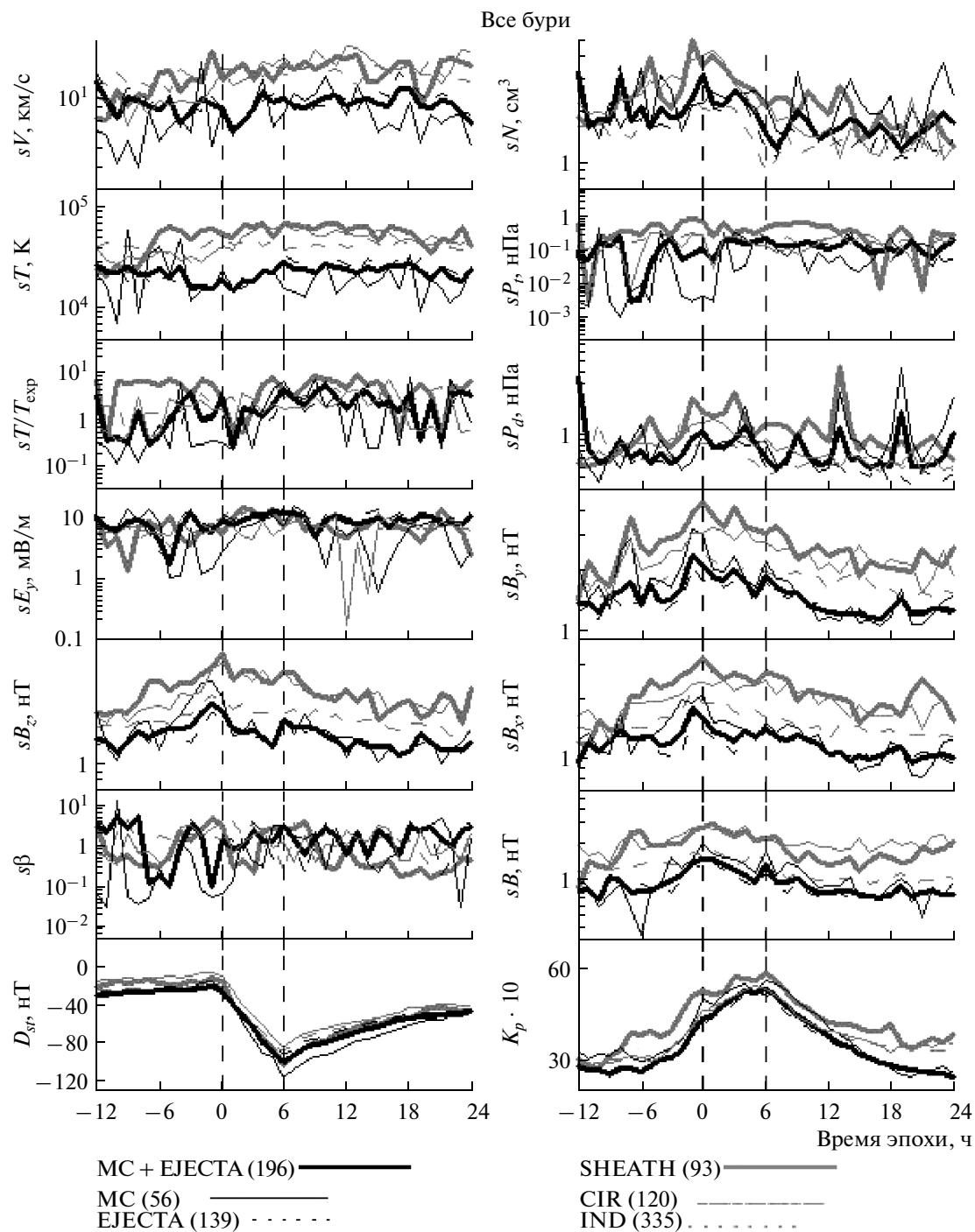


Рис. 2. Временной ход усредненных значений дисперсии для тех же 12 параметров, что и на рис. 1, полученные по двойному методу наложения эпох для всех бурь, генерированных различными межпланетными типами течений.

были получены с помощью различных приборов и могут содержать методические особенности (см. подробнее “Обсуждение” в работе [4]).

2. Для некоторых составных параметров (см. раздел “Методика”) прямые измерения вариаций в ба-

зе OMNI отсутствуют, и мы оценили эти параметры на основании вариаций параметров, входящих в эти составные параметры и имеющиеся в базе OMNI.

3. Геоэффективными значениями электрического поля E_y и B_z компоненты межпланетного магнит-

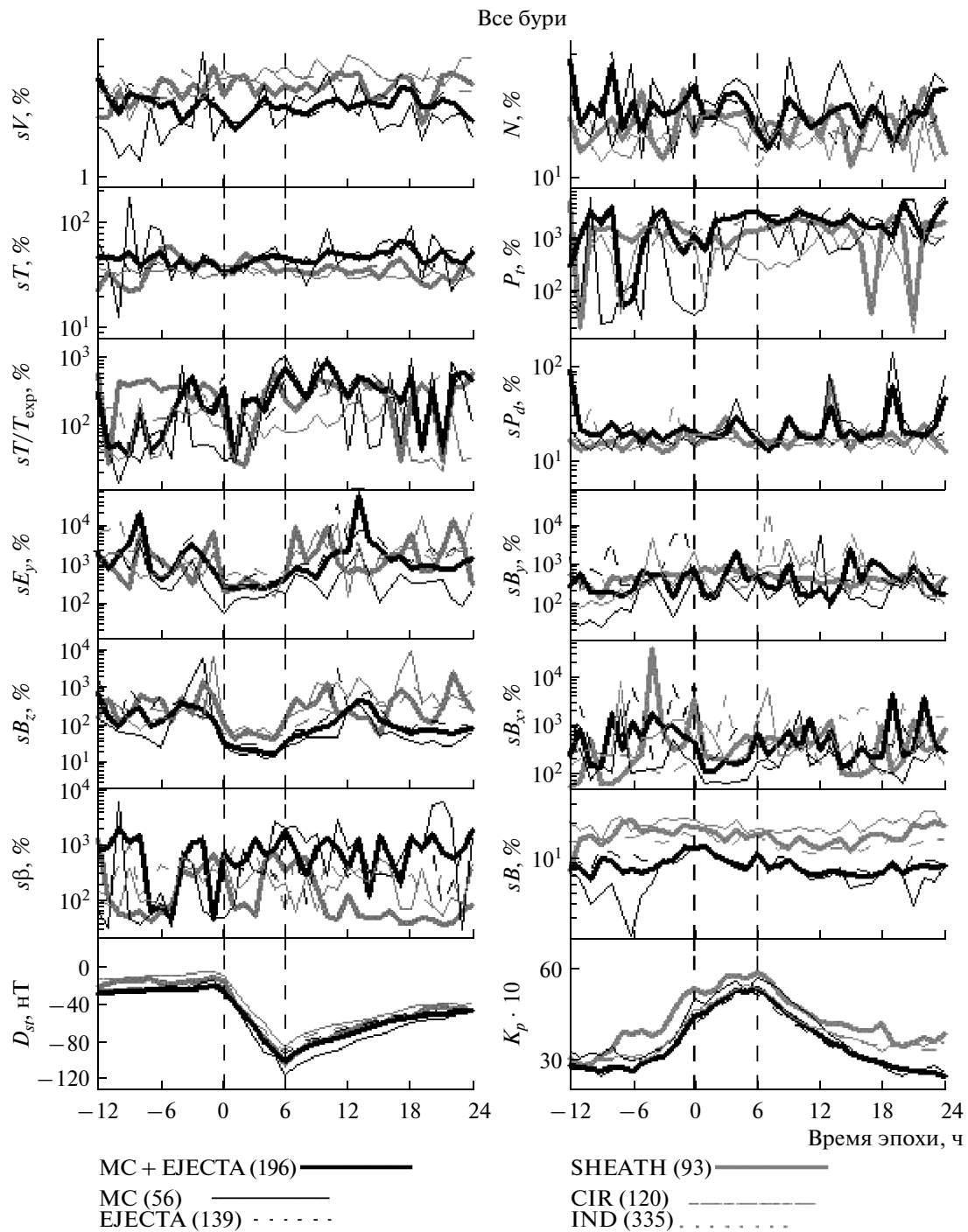


Рис. 3. Временной ход относительных вариаций (деленное на среднее значение и умноженное на 100) для тех же параметров, что показаны на рис. 2.

ного поля считались отрицательными, и поэтому более низкие средние значения этих параметров для того или иного типа солнечного ветра означают более высокие значения по величине (модулю), т.е. более “энергичные” значения возмущающих межпланетных факторов.

Представленные на рисунках и в таблице результаты о поведении 10 межпланетных параметров в

разных типах солнечного ветра во время главной фазы магнитных бурь можно сформулировать следующим образом.

По своим характеристикам, включая как средние значения, так и абсолютные и относительные вариации, все типы солнечного ветра, приводящие к магнитным бурям, явно тяготеют к 2 группам – (1)

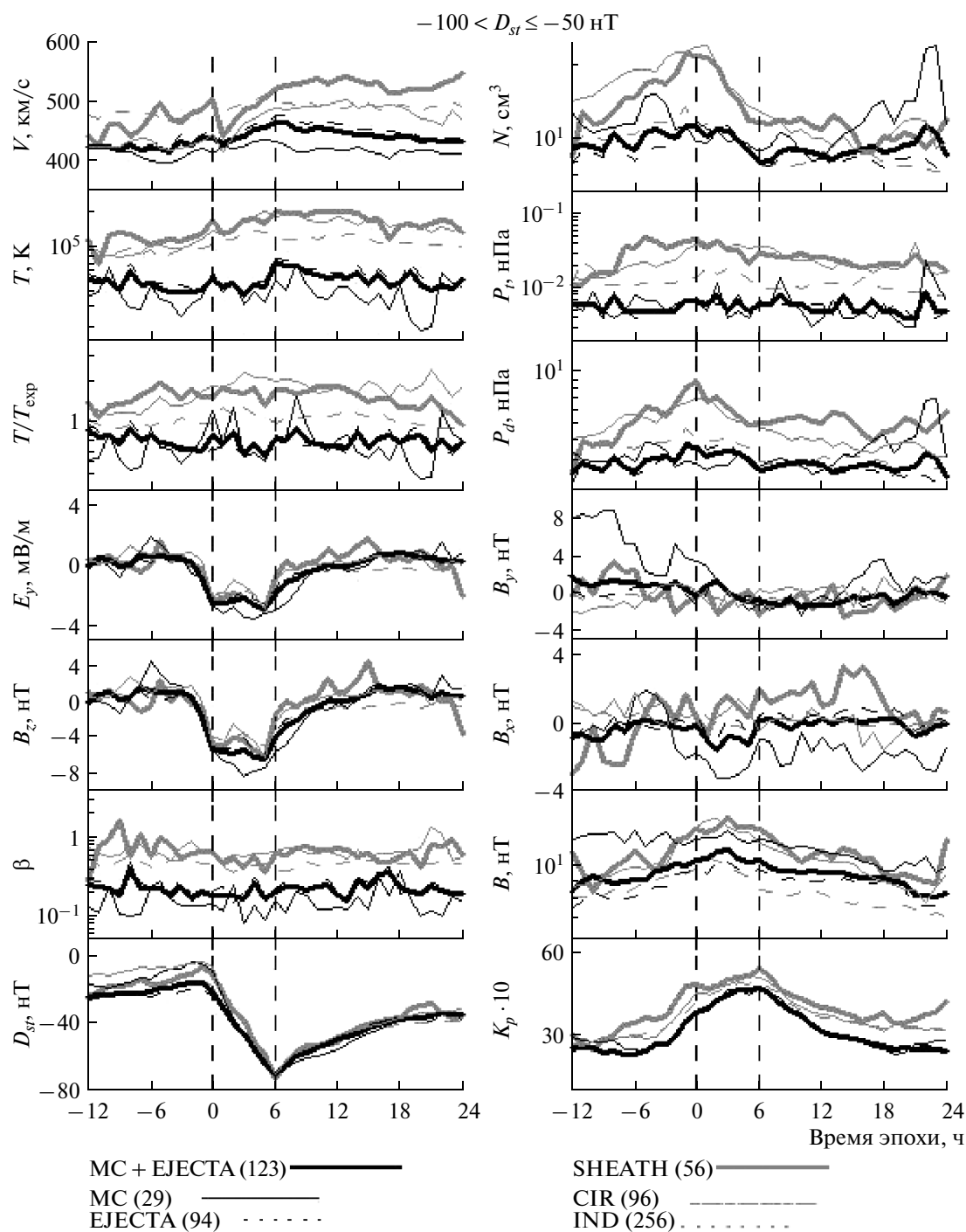


Рис. 4. Временной ход усредненных параметров, как на рис. 1. В отличие от рис. 1 представлены данные только для умеренных бурь с $-100 \text{ нТ} < D_{st} \leq -50 \text{ нТ}$.

MC и Ejecta и (2) Sheath и CIR, и ниже мы рассмотрим эти 2 группы.

1. Типы течений MC и Ejecta

Средние значения, абсолютные и относительные вариации для всех параметров оказываются

или средними, или ниже среднего (это относится и к средним значениям электрического поля E_y и B_z компоненты межпланетного магнитного поля).

Исключением оказываются высокие значения относительной вариации концентрации $sN/\langle N \rangle$ (и, возможно, производных параметров — динамиче-

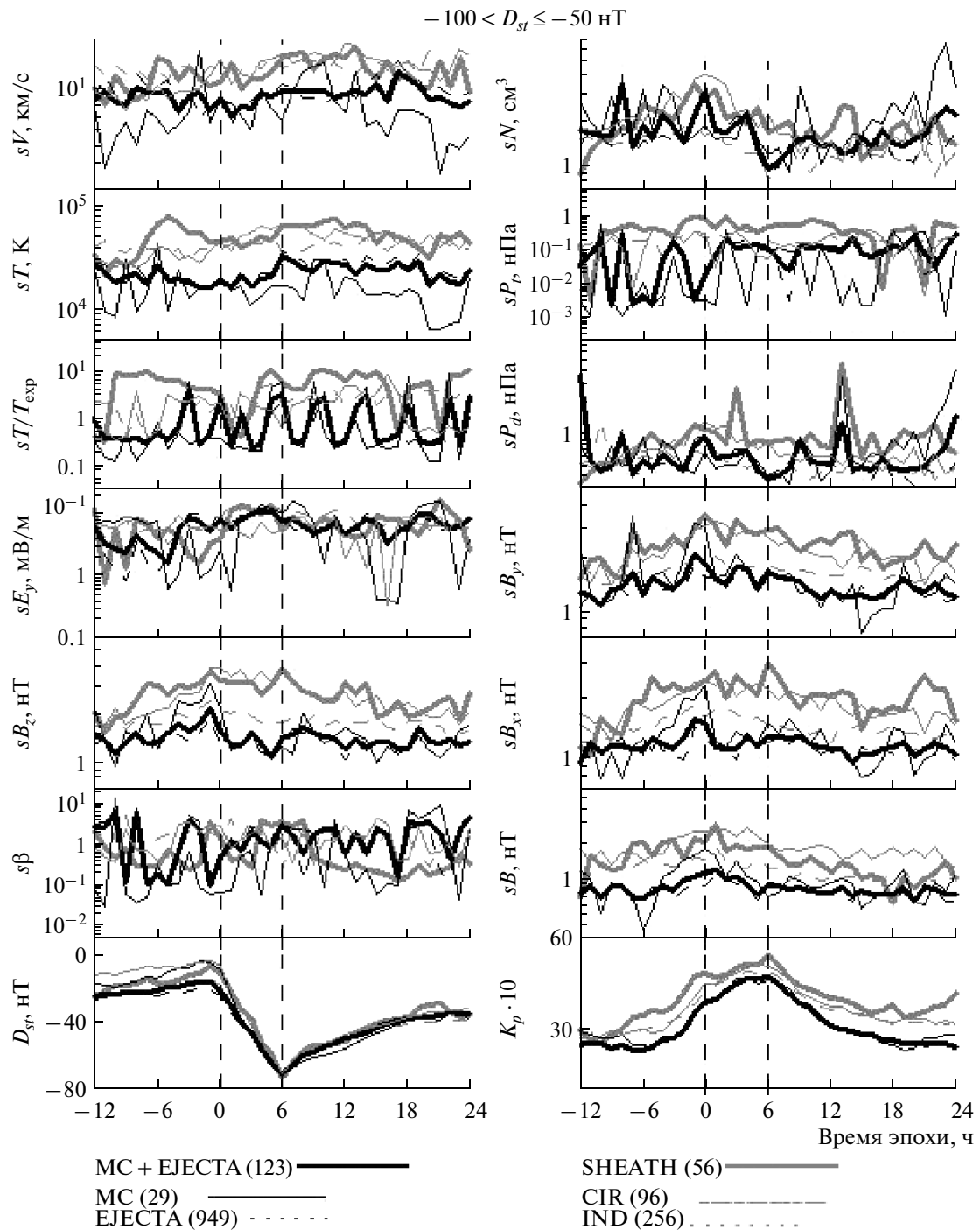


Рис. 5. Временной ход усредненных параметров, как на рис. 2. В отличие от рис. 2 представлены данные только для умеренных бурь с -100 нТ $< D_{st} \leq -50$ нТ.

ского и теплового давлений) и средней величины модуля магнитного поля $\langle B \rangle$ в МС.

В отличие от событий МС, компоненты и величина (модуль) магнитного поля и величина электрического поля в Ејеста меньше и близки к средним по всем типам солнечного ветра.

Заметных различий рассматриваемых параметров для “всех”, средних и сильных бурь не наблюдается.

2. Типы течений Sheath и CIR

Значения и поведение параметров и их вариаций в Sheath и CIR близки друг к другу, причем в боль-

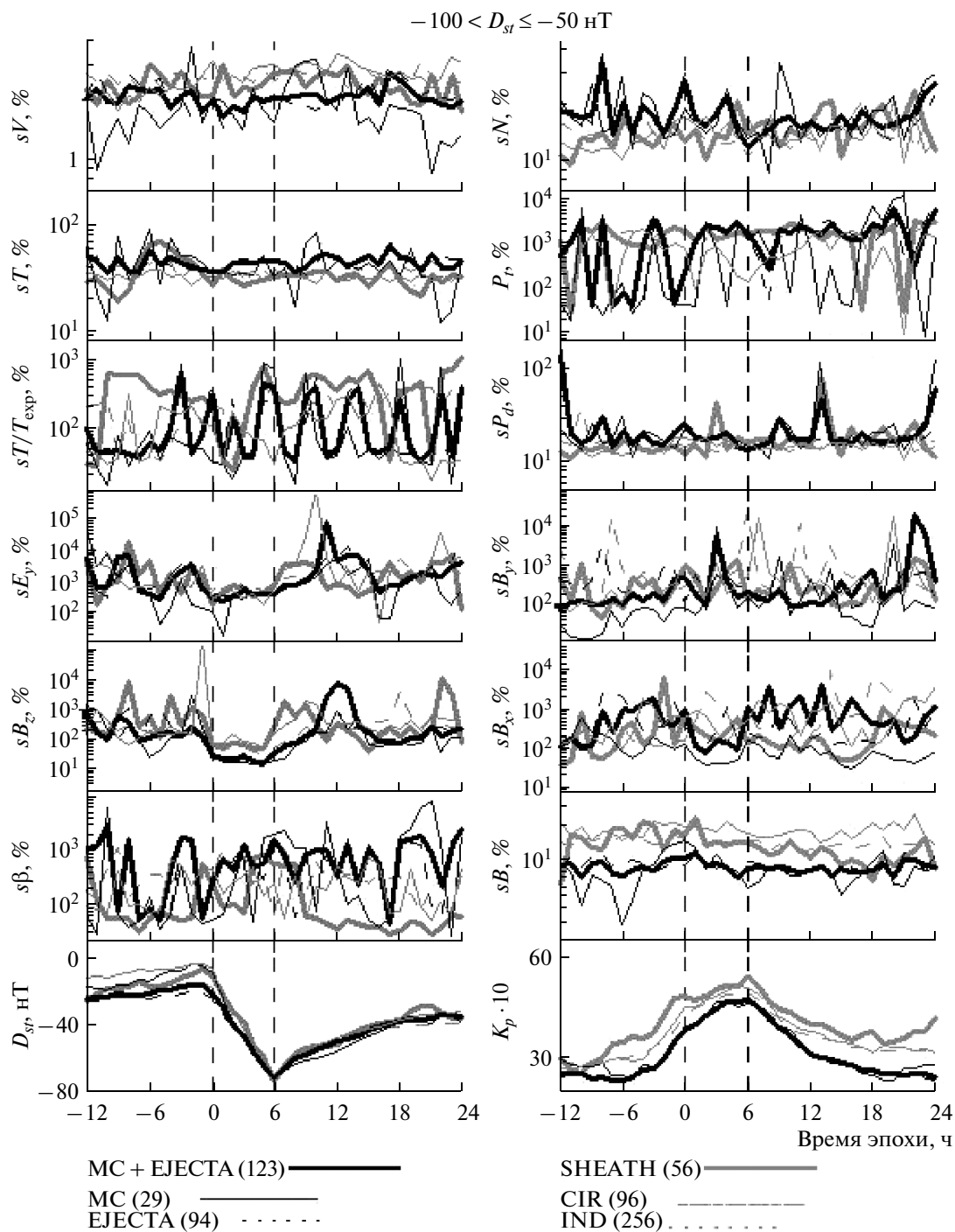


Рис. 6. Временной ход усредненных параметров, как на рис. 3. В отличие от рис. 3 представлены данные только для умеренных бурь с $-100 \text{ нТ} < D_{st} \leq -50 \text{ нТ}$.

шинстве случаев не только качественно, но и количественно.

Практически для всех параметров они демонстрируют высокие средние значения и абсолютные вариации.

Высокие значения наблюдаются для относительных вариаций скорости, B_z компоненты и модуля ММП.

Интересно отметить, что, в отличие от других параметров, для сильных магнитных бурь высокие от-

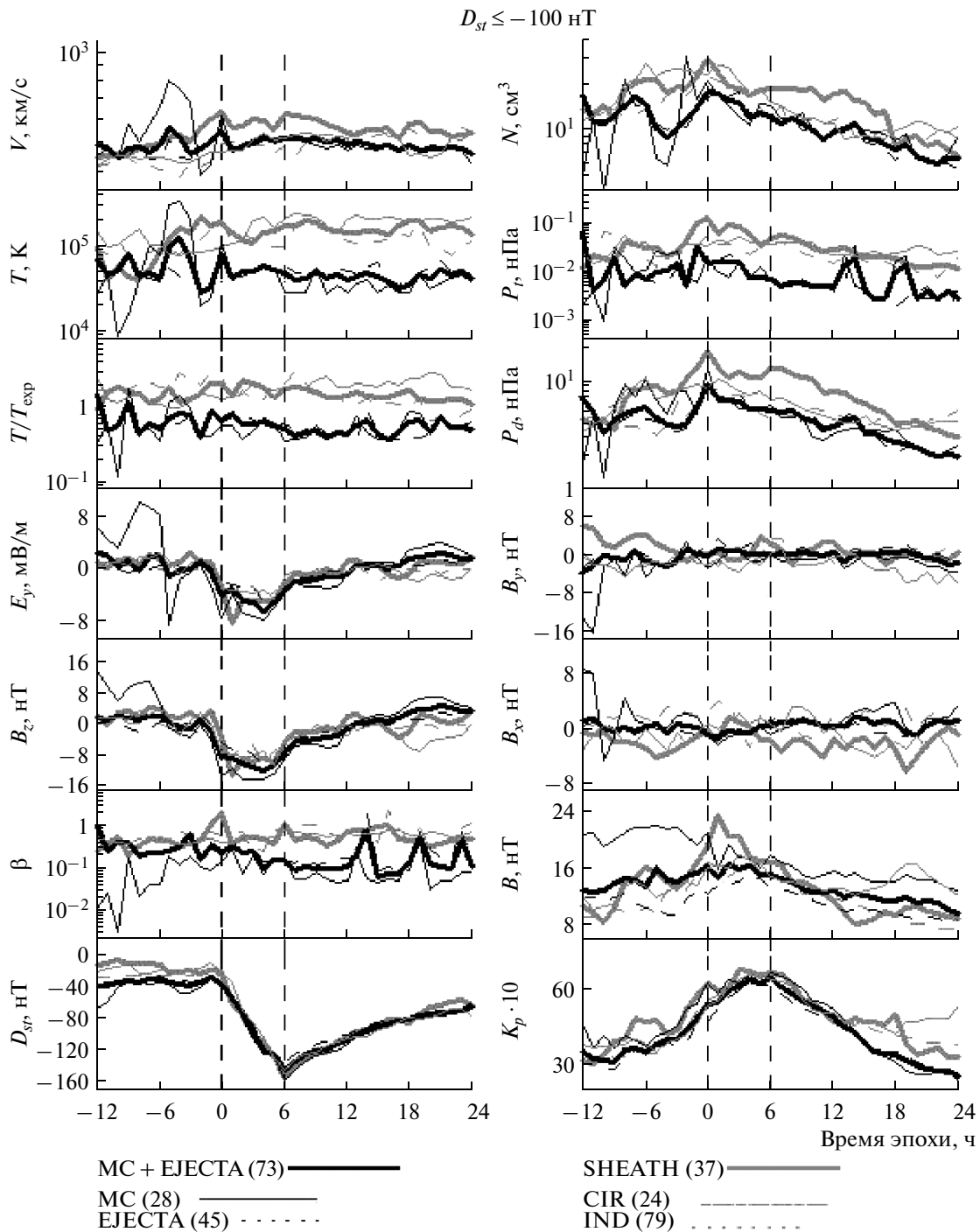


Рис. 7. Временной ход усредненных параметров, как на рис. 1. В отличие от рис. 1 представлены данные только для сильных бурь с $D_{st} \leq -100$ нТ.

носительные вариации концентрации наблюдаются в MC и Ejecta, а низкие в Sheath.

Значения средних величин параметров во многом определяются типом течения солнечного ветра (и используемыми критериями классификации типов солнечного ветра) и уже обсуждались в работе [1]. Как отмечалось во Введении, вариации ряда па-

раметров исследовались сравнительно мало, и в целом представленные результаты удовлетворительно согласуются с ранее опубликованными результатами [7–17]. Однако наши результаты обладают рядом преимуществ:

1 – используют достаточно полную (на современном уровне развития науки) классификацию

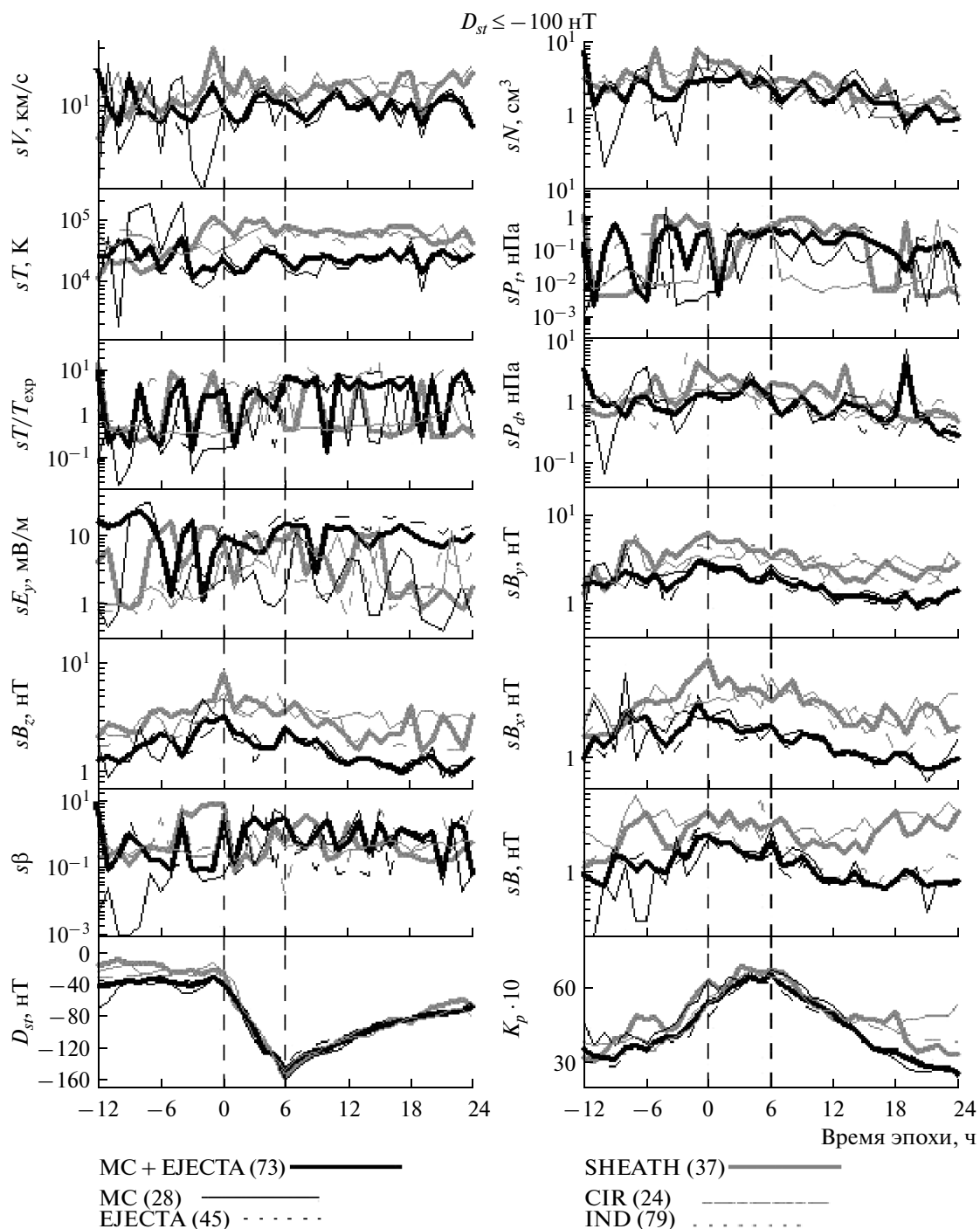


Рис. 8. Временной ход усредненных параметров, как на рис. 2. В отличие от рис. 2 представлены данные только для сильных бурь с $D_{st} \leq -100$ нТ.

типов солнечного ветра, в частности, отдельный анализ 2 подтипов ICME: MC и Ejecta; 2 – представляют анализ достаточно полного набора параметров солнечного ветра и ММП; 3 – параметры солнечного ветра и ММП анализируются не только в максимуме магнитной бури, а в динамике, на протяжении всей главной фазы магнитной бури (по двойному

методу наложенных эпох); 4 – сравниваются не только абсолютные (или только относительные) вариации параметров, а полная совокупность характеристик (динамика, средние значения, абсолютные и относительные вариации) параметров; 5 – отдельно исследуются условия для умеренных и сильных магнитных бурь.

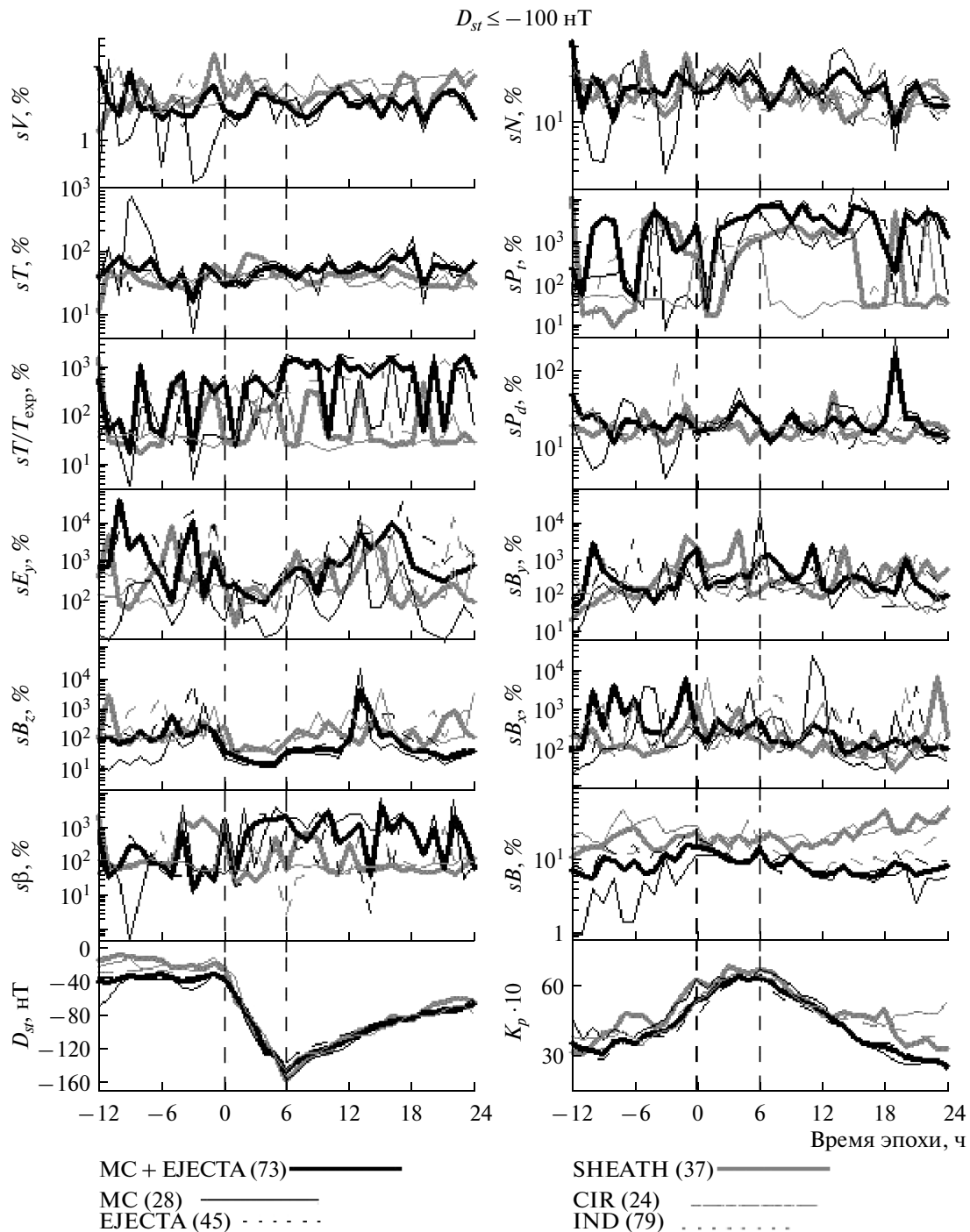


Рис. 9. Временной ход усредненных параметров, как на рис. 3. В отличие от рис. 3 представлены данные только для сильных бурь с $D_{st} \leq -100$ нТ.

Хорошо известно, что при описании воздействия солнечного ветра на магнитосферу наиболее часто используют два физических механизма: пересоединение магнитных полей межпланетного и магнитосферного происхождения на магнитопаузе [21] и вязкое взаимодействие плазменных потоков межпланетного и магнитосферного происхождения

на магнитопаузе [22]. Зависимость величины бури от величины южной компоненты ММП (или электрического поля E_y) свидетельствует в пользу пересоединения. Однако эффективность обоих этих механизмов существенно возрастает при повышении уровня турбулентности во взаимодействующих потоках. Полученные свидетельства того, что те типы

Характер изменения параметров солнечного ветра в разных типах течений, приведших к магнитным бурям с $D_{st} \leq -50$ нТ

Парам.	MC + Ejecta			MC			Ejecta			Sheath			CIR			IND		
	◇	s	s/◇	◇	s	s/◇	◇	s	s/◇	◇	s	s/◇	◇	s	s/◇	◇	s	s/◇
V	ннн	ннн	ннн	ннн	ннн	ннн	нсс	ннн	ннс	ввв	ввв	ввс	нсс	ввв	ввс	свс	ввв	ввс
T	ннн	ннн	ссс	ннн	ннн	ссс	ннн	ннн	ссс	ввв	ввв	ссв	ввв	ввв	ссс	ввв	ввв	ссс
T/T _{exp}	ннн	снс	ссс	ннн	снс	ссс	ннн	ссс	ссс	ввв	свс	ссс	ввв	свс	ссс	свс	ссс	ссс
N	ннн	нсс	свс	ннн	ннс	ввс	ннн	нсс	свс	свс	свс	снс	ввв	ввс	нсс	ннс	нсс	снс
P _t	ннн	снс	свс	ннн	ннс	снс	ннн	ссс	ссс	ввв	ввс	свс	ввв	ссс	снс	ссс	ссс	ссс
P _d	ннн	нсн	ссс	ннн	ннн	ссс	ннн	нсс	ссс	ввв	ввв	ссс	свс	ссс	ссс	нсн	ссс	ссс
E _y	ссс	ссс	ссс	ннн	снн	нсн	ссс	ссс	ссс	ссс	ссс	ссс	ссс	ссс	ссс	ссс	ссс	ссс
B _z	ссс	ннн	ннн	ннн	ннн	ннн	ссс	ннн	ннн	ссс	ввв	ввв	ссс	ввв	ввв	ссс	свс	ввв
B _x	ссс	ннн	снс	ннс	ннн	ннс	ссс	ннн	ссс	ввс	ввв	ссс	свс	ввс	ссс	ссс	ссс	ссс
B _y	ссс	ннн	снс	ссс	ннн	снс	ссс	ннн	снс	ссс	ввв	ссс	ссс	ввс	свс	ссс	ннс	ссс
B	ссс	ннн	ннн	ввс	нсн	ннн	ннн	ннн	ннн	ввв	ввв	свс	ввс	ввв	ввв	нсс	нсс	свс
β	ннн	ссс	свс	ннн	снс	ссс	ннн	ссс	ссс	ввв	ссс	нсн	ввв	ссс	ссс	ввс	ссс	ссс

Обозначения: н, с и в — величины ниже, вблизи и выше средних величин, соответственно.

течения солнечного ветра, которые содержат более высокий уровень вариаций (Sheath и CIR), более эффективно возбуждают магнитные бури, чем типы с низким уровнем вариаций (MC), говорят в пользу возможного дополнительного воздействия обоих механизмов при возрастании уровня турбулентности в набегающем потоке солнечного ветра. Более высокий уровень флуктуаций (наряду с различиями средних величин для ряда параметров) в Sheath и CIR по сравнению с MC может быть ответственен за различную реакцию магнитосферы на различные типы солнечного ветра [23–27]. Более подробную информацию на этот счет можно получить, исследуя бюджет энергии, поступившей из солнечного ветра и потраченной на магнитосферные возмущения [28, 29].

В литературе часто можно встретить утверждения о связи магнитосферной активности с высокоскоростными потоками солнечного ветра (см., например, статью [30] и ссылки в ней)¹. Приведенные выше данные не подтверждают такие утверждения для магнитных бурь: в среднем на главной фазе бури величины скорости мало отличаются от средних значений скорости солнечного ветра и меняются в зависимости от типа солнечного ветра в достаточно узком диапазоне величин 450–550 км/с. Более важными для генерации магнитной бури являются флуктуации скорости на главной фазе бури, а не средние значения скорости, так как различия между типами течений по средней скорости составляют ~10–20%, а различия по абсолютным вариациям скорости — ~100%, но эти флуктуации, в основном,

связаны с типом солнечного ветра (наблюдаются в областях сжатия CIR и Sheath), а не с его скоростью. Так как области сжатия наблюдаются перед быстрыми типами солнечного ветра (CIR — перед быстрыми потоками из корональных дыр и Sheath — перед быстрыми ICME), то, хотя необходимые условия для генерации бурь создаются в областях сжатия CIR и Sheath, источниками бурь ошибочно считают высокоскоростные потоки солнечного ветра. Полученные нами данные свидетельствуют в пользу гипотез о заметном влиянии плотности и ее вариаций (и производных от плотности параметров — прежде всего динамического и теплового давлений) и вариаций ММП на магнитосферную активность (см., например, статьи [31–33] и ссылки в них), и исследования в этом направлении представляются достаточно перспективными.

Авторы благодарны за возможность использования базы данных OMNI. Данные OMNI получены из GSFC/SPDF OMNIWeb на сайте <http://omniweb.gsfc.nasa.gov>.

Работа поддержана грантами РФФИ № 07-02-00042, № 10-02-00277а и Программой 16 ОФН РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ермолаев Ю.И., Лодкина И.Г., Николаева Н.С., Ермолаев М.Ю. Статистическое исследование влияния межпланетных условий на геомагнитные бури // Космич. исслед. 2010. Т. 48. № 6. (Cosmic Research. P. 1).
2. Ермолаев Ю.И., Николаева Н.С., Лодкина И.Г., Ермолаев М.Ю. Каталог крупномасштабных явлений солнечного ветра для периода 1976–2000 гг. // Космич. исслед. 2009. Т. 47. № 2. P. 99–113. (Cosmic Research. P. 81.)
3. Ермолаев Ю.И., Ермолаев М.Ю., Лодкина И.Г., Николаева Н.С. Статистическое исследование гелио-

¹ Возможно, что в ряде работ используемая терминология является следованием сложившихся традиций. Однако, на наш взгляд, эта терминология не отражает реальных физических процессов и вводит читателя в заблуждение.

- сферных условий, приводящих к магнитным бурям // Космич. исслед. 2007. Т. 45. № 1. С. 3–11. (Cosmic Research. P. 1).
4. Ермолаев Ю.И., Ермолаев, М.Ю., Лодкина И.Г. Николаева Н.С. Статистическое исследование гелиосферных условий, приводящих к магнитным бурям, 2 часть // Космич. исслед. 2007. Т. 45. № 6. С. 489–498. (Cosmic Research. P. 461).
 5. Yermolaev Yu.I., Yermolaev M.Yu., Nikolaeva N.S., Lodkina L.G. Interplanetary conditions for CIR-induced and MC-induced geomagnetic storms // Bulg. J. Phys. 2007. V. 34. P. 128–135.
 6. Twelfth International Solar Wind Conference. Saint-Malo, France, 21–26 June 2009. AIP Conference Proceedings / Eds Maksimovic M., Meyer-Vernet N., Moncuquet M., Pantellini F. 2010. V. 1216.
 7. Feldstein Y.I. Modelling of the magnetic field of magnetospheric ring current as a function of interplanetary medium parameters // Space Sci. Rev. 1992. V. 59. P. 83–165.
 8. Tsurutani B.T., Gonzalez W.D., Gonzalez A.L.C. et al. Interplanetary origin of geomagnetic activity in the declining phase of the solar cycle // J. Geophys. Res. 1995. V. 100. № A11. P. 21717–21733.
 9. Goncharova M.Yu., Maltsev Yu.P. Correlation of the Kp Index with the Solar-Wind Parameter // Geomagnetism and Aeronomy. 2001. V. 41. № 3. P. 305–309.
 10. Borovsky J.E., Funsten H.O. Role of Solar Wind Turbulence in the Coupling of the Solar Wind to the Earth's Magnetosphere // J. Geophys. Res. 2003. V. 108. № A6. P. 1246.
 11. D'Amicis R., Bruno R., Bavassano B. Is geomagnetic activity driven by solar wind turbulence? // Geophys. Res. Lett. 2007. V. 34. L05108. doi: 10.1029/2006GL028896.
 12. Romanova N., Pilipenko V., Crosby N., Khabarova O. ULF Wave Index and Its Possible Applications in Space Physics // Bulg. J. Phys. 2007. V. 34. P. 136–148.
 13. Jankovicova D., Voros Z., Simkanin J. The influence of solar wind turbulence on geomagnetic activity // Nonlin. Processes Geophys. 2008. V. 15. P. 53–59.
 14. Badruddin V.G. Interplanetary structures and solar wind behaviour during major geomagnetic perturbations // J. Atmos. Terr. Phys. 2009. V. 71. P. 885–896.
 15. Yokoyama N., Kamide Y. Statistical nature of geomagnetic storms // J. Geophys. Res. 1997. V. 102. № A7. P. 14215.
 16. Кершенгольц С.З., Баркова Е.С., Плотников И.Я. Зависимость геомагнитных возмущений от экстремальных значений E_u -компоненты солнечного ветра // Геомагнетизм и аэрномия. 2007. Т. 46. № 2. С. 1–9.
 17. Plotnikov I.Ya., Barkova E.S. Advances in space research nonlinear dependence of Dst and AE indices on the electric field of magnetic clouds // Adv. Space. Res. 2007. V. 40. P. 1858–1862.
 18. King J.H., Papitashvili N.E. Solar wind spatial scales in and comparisons of hourly Wind and ACE plasma and magnetic field data // J. Geophys. Res. 2004. V. 110. A2. A02209. doi: 10.1029/2004JA010804.
 19. Ермолаев Ю.И., Николаева Н.С., Лодкина И.Г., Ермолаев М.Ю. Относительная частота появления и геоэффективность крупномасштабных типов солнечного ветра // Космич. исслед. 2010. Т. 48. № 1. С. 3–32. (Cosmic Research. P. 1).
 20. Lopez R.E., Freeman J.W. Solar wind proton temperature-velocity relationship // Geophys. Res. 1986. V. 91. P. 1701.
 21. Dungey J.W. Interplanetary magnetic field and the auroral zones // Phys. Rev. Lett. 1961. № 6. P. 47.
 22. Axford W.I., Hines C.O. A unifying theory of high-latitude geophysical phenomena and geomagnetic storms // Can. J. Phys. 1961. № 39. P. 1433.
 23. Borovsky J.E., Denton M.H. Differences between CME-driven storms and CIR-driven storms // J. Geophys. Res. 2006. V. 111. A07S08. doi: 10.1029/2005JA011447.
 24. Denton M.H., Borovsky J.E. et al. Geomagnetic storms driven by ICME- and CIR dominated solar wind // J. Geophys. Res. 2006. V. 111. A07S07. doi: 10.1029/2005JA011436.
 25. Despirak I.V., Lubchich A.A., Yahnin A.G. et al. Development of substorm bulges during different solar wind structures // Annales Geophysicae. 2009. V. 27. № 5. P. 1951.
 26. Huttunen K.E.J., Koskinen H.E.J., Karinen A., Mursula K. Asymmetric development of magnetospheric storms during magnetic clouds and sheath regions // Geophys. Res. Lett. 2006. V. 33. L06107. doi: 10.1029/2005GL024894.
 27. Pulkkinen T.I., Partamies N. et al. Differences in geomagnetic storms driven by magnetic clouds and ICME sheath regions // Geophys. Res. Lett. 2007. V. 34. L02105. doi: 10.1029/2006GL027775.
 28. Yermolaev Yu.I., Nikolaeva N.S., Lodkina L.G., Yermolaev M.Yu. Specific interplanetary conditions for CIR-, Sheath-, and ICME-induced geomagnetic storms obtained by double superposed epoch analysis, preprint <http://arxiv.org/abs/0911.3315>, 2009.
 29. Turner N.E., Cramer W.D., Earles S.K., Emery B.A. Geoefficiency and energy partitioning in CIR-driven and CME-driven storms // J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2009. V. 71. № 10–11. P. 1023–1031.
 30. Borovsky J.E. and Denton M.H. Magnetic field at geosynchronous orbit during high-speed stream-driven storms: Connections to the solar wind, the plasma sheet, and the outer electron radiation belt // J. Geophys. Res. 2010. № 115. A08217. doi: 10.1029/2009JA015116.
 31. Khabarova O.V. and Yermolaev Yu.I. Solar wind parameters behavior before and after magnetic storms // J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2008. V. 70. P. 384–390. doi: 10.1016/j.jastp.2007.08.024.
 32. Weigel R.S. Solar wind density influence on geomagnetic storm intensity // J. Geophys. Res. 2010. doi: 10.1029/2009JA015062.
 33. Simms L.E., Pilipenko V. and Engebretson M.J. Determining the Key Drivers of Magnetospheric Pc5 Wave Power // J. Geophys. Res. 2010. doi: 10.1029/2009JA015025.