

УДК 523.62-726

## НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ИДЕНТИФИКАЦИИ КРУПНОМАСШТАБНЫХ ТИПОВ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА И ИХ РОЛИ В ФИЗИКЕ МАГНИТОСФЕРЫ.

### 4. “ПОТЕРЯННЫЙ ДРАЙВЕР”

© 2021 г. Ю. И. Ермолаев<sup>1</sup>, \*, И. Г. Лодкина<sup>1</sup>, М. Ю. Ермолаев<sup>1</sup>,  
М. О. Рязанцева<sup>1</sup>, А. А. Хохлачев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт космических исследований РАН, г. Москва, Россия

\*yermol@iki.rssi.ru

Поступила в редакцию 17.12.2019 г.

После доработки 06.04.2020 г.

Принята к публикации 29.05.2020 г.

Одним из возмущенных типов солнечного ветра и драйверов магнитосферных возмущений является область сжатия перед быстрыми ICME – область Sheath. Перед этой областью приблизительно в половине случаев наблюдается межпланетная ударная волна, в половине случаев она не наблюдается. Однако значения параметров и их временные профили в этих двух видах области Sheath отличаются сравнительно мало, и поэтому область Sheath без ударной волны также геоэффективна, как и область Sheath с ударной волной: ею были сгенерированы около 10% магнитных бурь с минимумом  $Dst < -50$  нТл из всех магнитных бурь за интервал 1976–2017 г., для которых были идентифицированы межпланетные драйверы. Многие авторы не анализируют этот драйвер (поэтому мы называем его “потерянный драйвер”), и, следовательно, в их публикациях содержатся некорректные выводы по солнечно-земной физике.

DOI: 10.31857/S0023420621010039

#### ВВЕДЕНИЕ

В предыдущих наших работах [1–3] мы рассмотрели некоторые причины ошибочной идентификации типов солнечного ветра (СВ) и связанные с ней некорректные выводы по солнечно-земным связям. К таким причинам относятся следующие: (1) использование некорректных критериев идентификации, (2) использование ранее опубликованных ошибочных данных, (3) рассмотрение комбинации различных драйверов, прежде всего Sheath и ICME (включая MC и Ejecta), в качестве единой причины, так называемых CME-индуцированных событий. В настоящей работе мы хотим подробно рассмотреть еще одну причину, которую мы кратко называем “потерянный драйвер”. Эта проблема состоит в следующем.

Как хорошо известно, геоэффективная южная компонента межпланетного магнитного поля (ММП) в основном содержится в следующих возмущенных явлениях солнечного ветра (драйверах магнитосферных возмущений): CIR, Sheath и ICME (включая MC и Ejecta) [4, 5]. Если у разных авторов точки зрения на определения и критерии для CIR и ICME достаточно близки друг другу, то для Sheath они имеют принципиальное различие. Взглянем на определение Sheath в нескольких по-

следних обзорах известных в данной области науки специалистов.

1. Richardson, I. G., and Cane, H. V. [6]: “The shock and ICME are separated by a sheath of compressed, heated, and often turbulent, ambient solar wind plasma”.

2. Kilpua, E., Koskinen, H. E. J., and Pulkkinen, T. I. [7]: “The turbulent region between the shock and the ICME is called the sheath region”.

3. Tsurutani, B. T., Lakhina, G.S., and Hajra, R. [8]: “The compressed plasma and magnetic fields downstream of the shock is the “sheath”.

Таким образом, указанные авторы (а также авторы многих других работ, в частности [9–11]) областью Sheath называют только область между межпланетной ударной волной (IS) и ICME. Повидимому, это дань традиции, так как этот термин был позаимствован у magnetosheath – области между околоземной ударной волной и магнитопаузой. Однако, в отличие от magnetosheath, где скорость набегающего солнечного ветра относительно препятствия всегда больше скорости звука (число Маха  $> 1$ ), в случае с ICME скорость набегающего солнечного ветра может быть, как выше скорости звука, так и ниже, т.е. область сжатия перед быстрым явлением ICME может образовываться, как в присутствии ударной волны, так и в ее отсутствии. Следуя определению вышеуказан-

ных авторов, область сжатия перед ICME без IS не является Sheath и исключается из рассмотрения при анализе межпланетных драйверов магнитосферных возмущений. В этом состоит смысл термина “потерянный драйвер”.

Этот тип солнечного ветра был включен в наш каталог крупномасштабных явлений солнечного ветра (см. статью [12] и сайт <ftp://ftp.iki.rssi.ru/pub/omni/catalog/>), который мы создали на основе базы OMNI (<http://omniweb.gsfc.nasa.gov>, см. [13]), и он учитывается как самостоятельный тип СВ при изучении различных аспектов солнечно-земной физики с использованием нашего каталога. В частности, в работе [14] мы для периода 1976–2000 гг. представили средние временные профили параметров плазмы СВ и ММП для 8 наиболее часто встречающихся последовательностей типов СВ: (1) SW/CIR/SW, (2) SW/IS/CIR/SW, (3) SW/Ejecta/SW, (4) SW/Sheath/Ejecta/SW, (5) SW/IS/Sheath/Ejecta/SW, (6) SW/MC/SW, (7) SW/Sheath/MC/SW, (8) SW/IS/Sheath/MC/SW, где SW – солнечный ветер. Эти результаты наглядно показали, что (1) области Sheath перед обоими типами ICME (MC и Ejecta) как с IS, так и без IS, надежно идентифицируются при одних и тех же пороговых критериях ключевых параметров, и основное различие заключается лишь в наличии скачка параметров на IS для Sheath с IS и более плавном и слабом их изменении на переднем крае для Sheath без IS; (2) число генерированных магнитных бурь с минимумом  $Dst < -50$  нТл в обоих типах Sheath приблизительно одинаковое, а их интенсивность несколько выше для Sheath с IS за счет более высокой южной компоненты ММП в области Sheath, так как при генерации IS область ICME движется быстрее относительно набегающего потока и сильнее сжимает плазму. Эти результаты были получены при сравнительно небольшой статистике. Однако, наш каталог продолжает развиваться и в настоящее время охватывает период 1976–2017 гг., при этом количество надежно идентифицированных событий выросло приблизительно вдвое за счет более качественного мониторинга параметров СВ в передней либрационной точке со второй половины 90-х годов.

Целью настоящей работы является на основе более качественного набора данных для периода 1976–2017 гг. сравнить два типа области сжатия перед быстрыми MC и Ejecta: с ударной волной и без нее, а также оценить ущерб от игнорирования области сжатия без ударной волны для солнечно-земной физики.

## МЕТОДИКА

В настоящей статье мы используем 1-часовые данные параметров солнечного ветра и межпланетного магнитного поля из базы OMNI

(<http://omniweb.gsfc.nasa.gov>, см. [13]), наш каталог крупномасштабных явлений солнечного ветра (см. сайт <ftp://ftp.iki.rssi.ru/pub/omni/> и статью [12], описывающую методику идентификации типов СВ) и двойной метод наложенных эпох (ДМНЭ) [15]. ДМНЭ заключается в том, что мы равномерно изменяем (уменьшаем или увеличиваем) расстояние между точками интервала таким образом, чтобы можно было совместить начала и концы всех интервалов и исследовать средние временные профили параметров для интервалов, которые первоначально имеют разную длительность. Для ДМНЭ мы отобрали те интервалы, которые имеют полные наборы данных. При анализе поведения параметров мы рассматривали интервалы Sheath в 4 вариантах последовательности типов СВ: IS/Sheath/Ejecta – интервалы Sheath, сопровождающиеся предшествующей ударной волной и последующим интервалом Ejecta; Sheath/Ejecta – интервалы Sheath без предшествующей ударной волны и с последующим интервалом Ejecta; IS/Sheath/MC – интервалы Sheath, сопровождающиеся предшествующей ударной волной и последующим интервалом MC; Sheath/MC – интервалы Sheath без предшествующей ударной волны и с последующим интервалом MC.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты работы представлены в виде табл. 1 и рис. 1–4. Средние и среднеквадратичные отклонения некоторых параметров для 4 типов Sheath, представленные в таблице, позволяют количественно сравнить эти типы между собой.

На рис. 1–4 приведены временные профили ряда параметров межпланетной среды и магнитосферных индексов для 4 последовательностей: (1) SW/IS/Sheath/Ejecta, (2) SW/Sheath/Ejecta, (3) SW/IS/Sheath/MC и (4) SW/Sheath/MC. Форматы рисунков одинаковы и близки к формату рисунков в нашей предыдущей работе [14], полученных по данным 1976–2000 гг. Каждый из четырех рисунков содержит 10 панелей, на которых изображены средние временные профили анализируемых параметров, полученные по ДМНЭ для областей Sheath (для солнечного ветра до Sheath с 0 по 5 точки и ICME после Sheath с 20 по 25 точки использовался простой метод наложенных эпох с опорными точками на концах интервала Sheath): а – отношение теплового и магнитного давления  $\beta$ , тепловое давление  $P_t$ , относительное содержание альфа-частиц  $N_\alpha/N_p$ ; б – протонная температура  $T \cdot 10^{-5}$  К и отношение измеренных и ожидаемых температур  $T/T_{exp}$ ; в – углы вектора скорости  $\Phi$ ,  $\Theta$ ; г – составляющая ММП  $B_z$ , компонента электрического поля  $E_y$ ; д –  $Dst$  и  $Dst^*$  индексы; е – величина ММП  $B$  и динамическое давление  $P_d$ ; ж – компоненты ММП  $B_x$ ,  $B_y$ ; з – звуковая и альфеновские скорости  $V_s$  и  $V_a$ ; и – плот-

**Таблица 1.** Средние значения и среднеквадратичные отклонения параметров СВ для 4 типов Sheath

	IS Sheath Ejecta	Sheath Ejecta	IS Sheath MC	Sheath MC
Кол-во событий* (полное кол-во событий)	346 (381)	323 (432)	147 (152)	23 (28)
Продолжительность событий, ч	16.4 ± 9.6	14.0 ± 8.8	12.4 ± 6.1	12.8 ± 9.5
Кол-во магн. бурь	61	59	24	3
$V$ , км/с	460 ± 108	439 ± 95	497 ± 141	433 ± 97
$T \cdot 10^{-5}$ , К°	1.90 ± 1.78	1.70 ± 1.41	2.56 ± 3.62	1.69 ± 1.69
$T/T_{\text{exp}}$	2.18 ± 1.24	2.29 ± 1.23	2.21 ± 1.67	2.28 ± 1.29
$N$ , см <sup>-3</sup>	12.4 ± 9.5	9.7 ± 6.4	16.1 ± 11.3	13.5 ± 8.3
$B$ , нТл	9.9 ± 4.7	8.2 ± 3.6	13.6 ± 7.8	10.0 ± 5.1
$\beta$	0.87 ± 0.99	0.90 ± 0.91	0.76 ± 0.85	0.85 ± 0.85
$Pt$ , нПа	0.028 ± 0.035	0.020 ± 0.025	0.050 ± 0.084	0.027 ± 0.039
$Pd$ , нПа	4.04 ± 3.19	2.93 ± 2.19	6.54 ± 6.28	3.90 ± 2.71
$Vx$ , нТл	0.15 ± 4.71	-0.17 ± 4.32	0.36 ± 6.30	-0.23 ± 5.27
$Vy$ , нТл	0.13 ± 6.52	0.24 ± 5.13	1.28 ± 9.21	0.45 ± 6.72
$Vz$ , нТл	0.068 ± 5.44	-0.24 ± 4.16	-0.44 ± 7.70	0.48 ± 5.30
$Ey$ , мВ/м	-0.02 ± 2.76	0.11 ± 1.90	0.29 ± 4.59	-0.25 ± 2.60
$Kp \cdot 10$	33 ± 16	29 ± 15	42.8 ± 18.9	31 ± 16
$Dst$ , нТл	-19 ± 36	-18 ± 27	-24 ± 54	-17 ± 27
$Dst^*$ , нТл	-28 ± 39	-23 ± 29	-37 ± 55	-26 ± 26
$AE$ , нТл	329 ± 286	278 ± 250	458 ± 394	303 ± 306
$\Phi$ , град	0.02 ± 4.00	0.72 ± 3.34	-0.69 ± 3.90	0.37 ± 3.48
$\Theta$ , град	0.01 ± 3.46	0.59 ± 3.40	-0.70 ± 4.28	0.80 ± 3.00
$Va$ , км/с	66 ± 43	59 ± 29	80 ± 56	64 ± 40
$Vs$ , км/с	66 ± 16	64 ± 13	70 ± 24	64 ± 15
$Na/Np$	0.040 ± 0.026	0.040 ± 0.027	0.046 ± 0.035	0.047 ± 0.034

\* Количество событий, используемое при анализе (в скобках общее количество идентифицированных событий в каталоге для интервала 1976–2017 гг.) для 4-х типов интервалов Sheath.

ность ионов  $N$  и  $Kp$  индекс;  $j$  – скорость плазмы  $V$ , индекс  $AE$ .

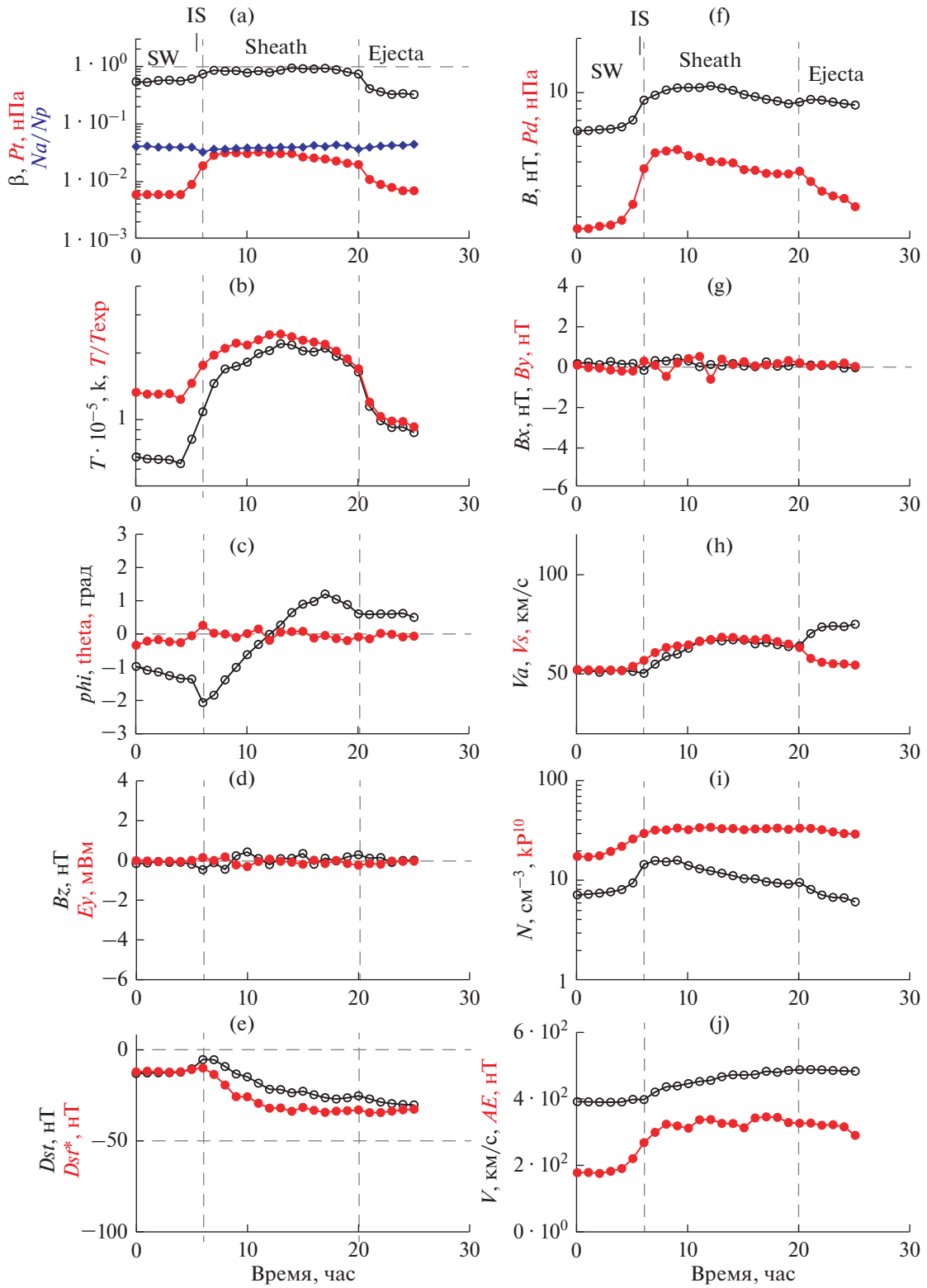
Прежде всего, обращает на себя внимание тот факт, что число событий Sheath перед Ejecta без IS (432) немного превосходит число событий с IS (381), а число Sheath перед MC с IS (152) существенно превосходит число событий без IS (28). После исключения из рассмотрения событий, для которых отсутствовал полный набор измерений, анализировалось немного меньшие числа событий: 346, 323, 147 и 23, соответственно. Хотя для многих параметров таблицы средние значения оказались близкими по величине к среднеквадратичным отклонениям, статистическая ошибка (среднеквадратичное отклонение, деленное на квадратный корень из числа точек) для некоторых из них оказалась маленькой, и в этом случае различия средних значений для разных типов Sheath можно считать статистически достоверными. В частности, данные таблицы показывают, что средняя длительность событий Sheath перед Ejecta больше, чем перед MC.

Полное число средних и сильных магнитных бурь с минимумом  $Dst < -50$  нТл за 1976–2017 гг. составило 1074, однако только для 639 бурь были достаточно надежно определены их межпланет-

ные драйверы из числа CIR, Sheath, Ejecta и MC, а остальные бури попали либо на интервал с пропуском межпланетных данных, либо были результатом действия нескольких последовательных драйверов. Количество магнитных бурь, генерированных Sheath перед Ejecta с и без IS практически одинаковое (61 и 59), а для MC различие более существенное (24 и 3), но оно получено при небольшой общей статистике MC по сравнению с Ejecta.

Как и ожидалось, средние значения  $V$ ,  $T$ ,  $N$ ,  $B$ ,  $Pd$  и  $Pt$ ,  $Va$ ,  $Vs$  и магнитосферных индексов оказались выше в областях Sheath с ударной волной IS и с последующим Ejecta (или с MC), чем без IS.  $T/T_{\text{exp}}$  и  $\beta$ -параметр наоборот выше в Sheath без IS. Средние значения параметров ( $V$ ,  $T$ ,  $T/T_{\text{exp}}$ ,  $N$ ,  $Pt$ ,  $Pd$ ,  $Kp$ ,  $Dst$ ,  $AE$ ,  $Va$ ,  $Vs$ ,  $Na/Np$ ) для интервалов с Sheath с последующим MC выше в сравнении со средними значениями для интервалов Sheath с последующим Ejecta. Компоненты ММП, электрическое поле и углы вектора скорости имеют небольшие значения вблизи нуля.

Графики параметров на рис. 1 и 2 для Sheath перед Ejecta имеют более гладкий вид, чем перед MC, так как число событий в первом случае значительно выше (см. табл. 1).



**Рис. 1.** Временной ход параметров солнечного ветра и магнитосферных индексов для последовательности IS/Sheath/Ejecta, полученные с помощью метода МНЭ и ДМНЭ: от 0 до 5 и от 20 до 25 точки применялся МНЭ без сжатия, от 6 до 19 точки применялся ДМНЭ со сжатием до 14 точек.

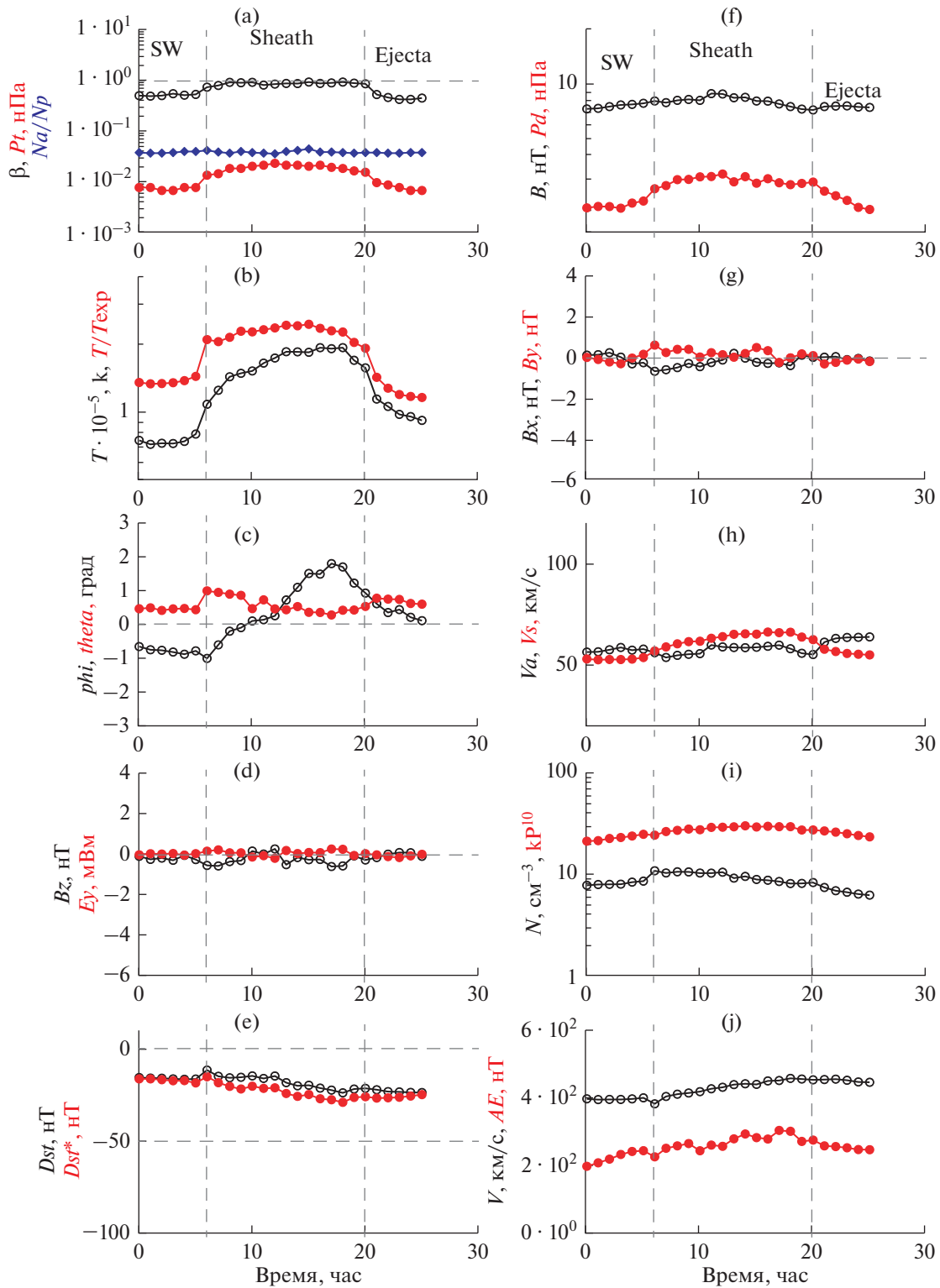


Рис. 2. То же, что на рис. 1, для Sheath/Еjecta.

Для событий Sheath с последующим Ejecta с ударной волной IS значения таких параметров, как величина магнитного поля  $B$ , тепловое и динамическое давление  $Pt$ ,  $Pd$ , скорость плазмы  $V$ ,

температура протонов  $T$  и  $T/T_{exp}$ ,  $Dst$  и  $Dst^*$  индексы, больше, чем без ударной волны (рис. 1 и 2). Это в основном связано с более резким возрастанием этих параметров в случае, если область Sheath на-

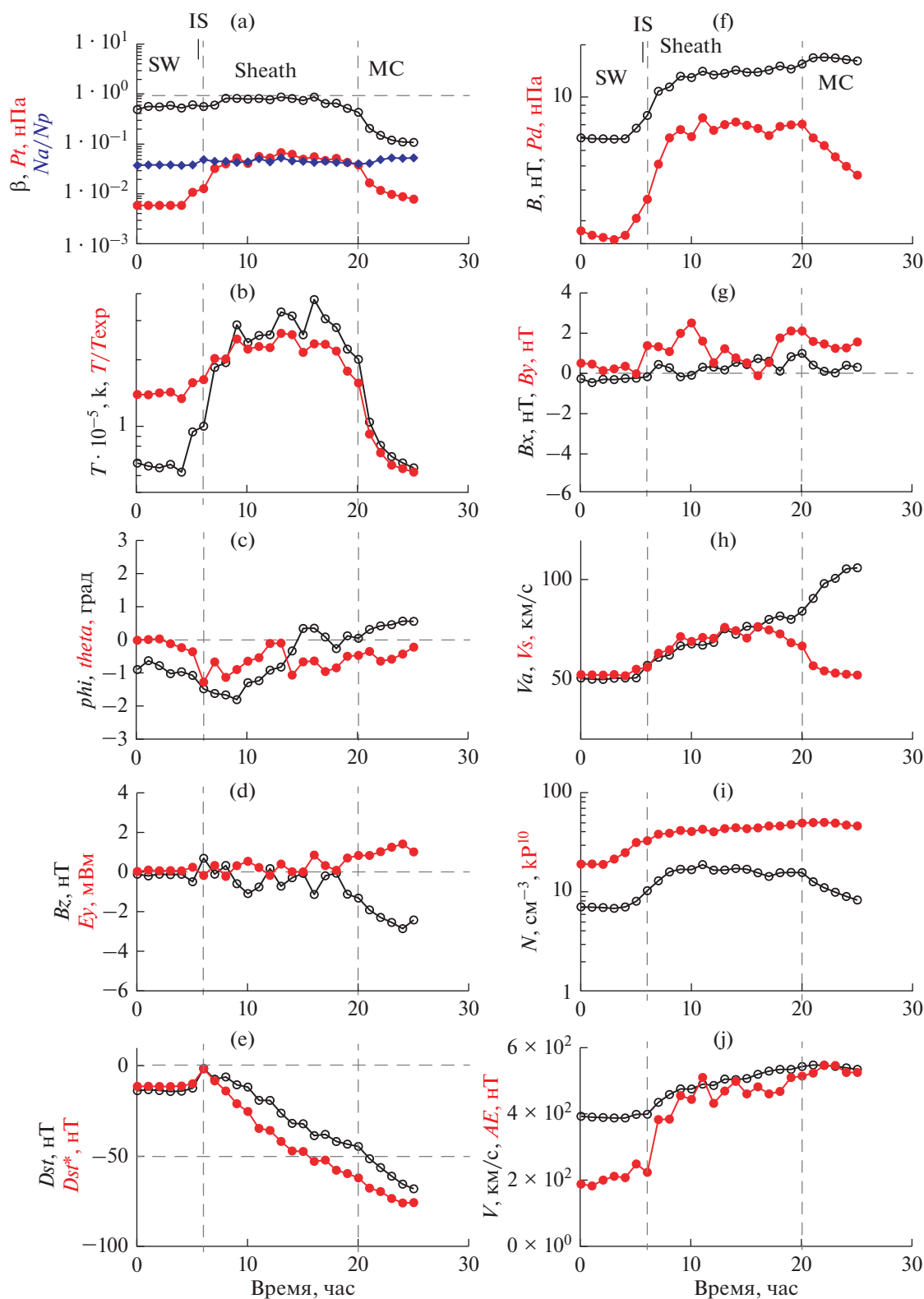


Рис. 3. То же, что на рис. 1, для IS/Sheath/MC.

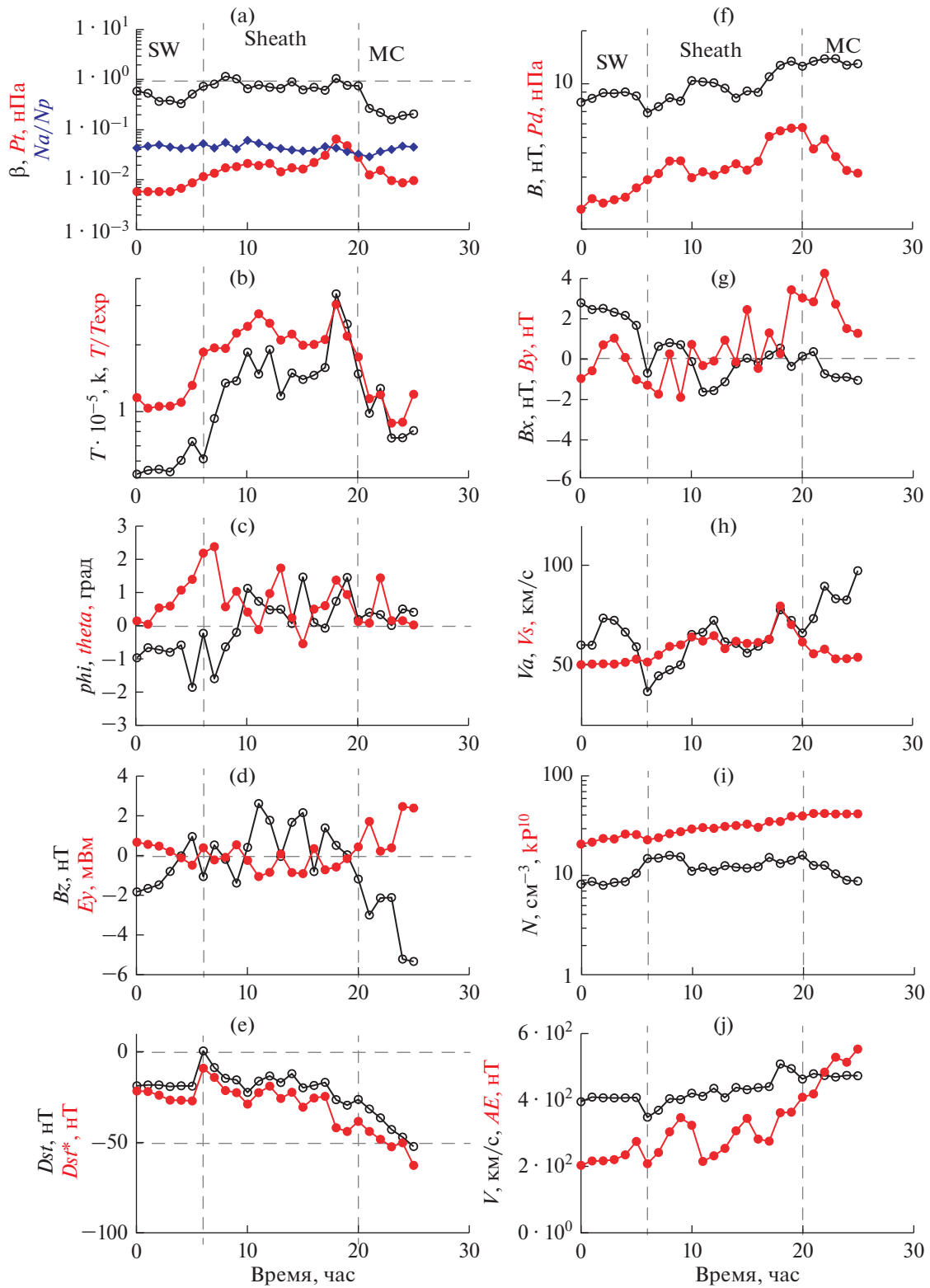


Рис. 4. То же, что на рис. 1, для Sheath/MC.

чинается с IS, так как в последующее время после 2–3 ч после начала области Sheath эти параметры изменяются похожим образом. Аналогичная ситуация и для событий Sheath с последующим MC с IS и без IS (рис. 3 и 4). Для событий Sheath с последующим MC значения параметров  $B$ ,  $Pt$ ,  $Pd$ ,  $V$ ,  $T$ ,  $T/TeXp$ ,  $Dst$ ,  $Dst^*$  выше, чем с последующим Ejecta.

Некоторые параметры (такие, как компоненты магнитного и электрического поля  $B_x$ ,  $B_y$ ,  $B_z$  и  $E_y$ ) являются знакопеременными. Так как внутри области Sheath они могут поменять знак и величину в произвольном месте интервала, то средняя линия слабо меняется вблизи нуля. Это же справедливо и для широтного угла вектора скорости СВ  $Theta$ . Однако долготный угол  $Phi$  до интервала Sheath имеет значения от  $-0$  до  $-1.5$  градуса, на границе интервала Sheath он сначала падает до  $-2$ , потом почти линейно растет до значения около  $+2$  и на заднем крае интервала возвращается к исходным значениям. Звуковая и альфеновская скорости и  $Va$  и  $Vs$  до интервала Sheath имеют значения около 50 км/с, на интервале Sheath значения возрастают более 60 км/с, после Sheath  $Va$  продолжает расти более 70 км/с, а  $Vs$  падает менее 50 км/с.

## ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

В настоящей работе на основе данных базы OMNI (<http://omniweb.gsfc.nasa.gov>, см. [13]) и нашего каталога крупномасштабных типов солнечного ветра для 42-летнего интервала 1976–2017 гг. (см. статью [12] и сайт <ftp://ftp.iki.rssi.ru/pub/omni/catalog/>), мы провели анализ области Sheath в 4 последовательностях событий: (1) IS/Sheath/Ejecta, (2) Sheath/Ejecta, (3) IS/Sheath/MC и (4) Sheath/MC. Представленные средние значения параметров (см. табл. 1) и средние временные профили параметров (см. рис. 1–4) в целом хорошо согласуются с основными выводами нашей предыдущей работы [14, 16], полученными для меньшего (25-летнего) набора данных в интервале 1976–2000 гг. Таким образом, при увеличении числа анализируемых событий приблизительно вдвое результаты практически не изменились, что доказывает независимость результата от размера выборки.

Во всех 4 разновидностях Sheath границы этой области надежно идентифицируются по следующим признакам: возрастание скорости СВ, возрастание абсолютной и относительной температуры, возрастание концентрации, возрастание модуля магнитного поля, возрастание теплового и кинетического давлений, возрастание плазменного бета-параметра.

Кроме того, долготный угол прихода потока меняется на передней границе от величины  $\sim -1$  до  $\sim -1.5 \dots -2$  градуса, затем в течение области

Sheath изменяется до  $\sim +1.5 \dots 2$  градуса и на задней границе области возвращается к значениям  $\sim 0$ . Эти результаты, полученные по увеличенной вдвое выборке 1976–2017 гг, подтверждают ранее полученные результаты на интервале 1976–2000 гг. [14, 17]. Мы назвали такое поведение углов в области Sheath “интегралоподобным” [17].

Из 639 магнитных бурь с минимумом  $Dst < -50$  нТл, для которых были достаточно надежно определены их межпланетные драйверы из числа CIR, Sheath, Ejecta и MC, количество магнитных бурь, генерированных Sheath перед Ejecta с и без IS практически одинаковое (61 и 59), а для MC (для них статистика была небольшой по сравнению с Ejecta) различие более существенное (24 и 3), но оно мало на фоне полного числа бурь, генерированных этими драйверами. Таким образом, область Sheath перед ICME с и без IS генерировала 64 бури из 639, т.е. около 10%, в то время как наиболее часто употребляемый источник бурь MC генерировал 118 бурь, т.е. около 18%.

Как показывают приведенные данные, область Sheath без ударной волны IS наблюдается перед ICME практически столь же часто, как и Sheath с IS, достаточна геоэффективна и является драйвером около 10% всех бурь, для которых удалось идентифицировать межпланетный источник. Исключение из рассмотрения этого межпланетного “потерянного драйвера” магнитосферных возмущений приводит к очевидным ошибкам в изучении солнечно-земных связей.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект 16-12-10062.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ермолаев Ю.И., Лодкина И.Г., Николаева Н.С. и др. Некоторые вопросы идентификации крупномасштабных типов солнечного ветра и их роли в физике магнитосферы // Космич. исслед. 2017. Т. 55. № 3. С. 189–200. (Cosmic Research. P. 178–189). <https://doi.org/10.7868/S0023420617030025>
2. Лодкина И.Г., Ермолаев Ю.И., Ермолаев М.Ю., Рязанцева М.О. Некоторые вопросы идентификации крупномасштабных типов солнечного ветра и их роли в физике магнитосферы. 2 // Космич. исслед. 2018. Т. 56. № 5. С. 300–309. (Cosmic Research. P. 370–381). <https://doi.org/10.1134/S0010952518050052>
3. Лодкина И.Г., Ермолаев Ю.И., Ермолаев М.Ю., Рязанцева М.О., Хохлачев А.А. Некоторые вопросы идентификации крупномасштабных типов солнечного ветра и их роли в физике магнитосферы. 3. Использование опубликованных некорректных данных // Космич. исслед. 2020. Т. 58. № 5. С. 377. <https://doi.org/10.31857/S0023420620050076>
4. Gonzalez W.D., Tsurutani B.T., Clua de Gonzalez A.L. Interplanetary origin of geomagnetic storms // Space Sci. Rev. 1999. V. 88. P. 529–562.



5. *Yermolaev Yu.I., Yermolaev M.Yu., Zastenker G.N. et al.* Statistical studies of geomagnetic storm dependencies on solar and interplanetary events: a review // *Planetary and Space Science*. 2005. V. 53/1–3. P. 189–196.
6. *Richardson I.G., Cane H.V.* Near-Earth Interplanetary Coronal Mass Ejections During Solar Cycle 23 (1996–2009): Catalog and Summary of Properties // *Sol. Phys.* 2010. V. 264. P. 189.  
<https://doi.org/10.1007/s11207-010-9568-6>
7. *Kilpua E., Koskinen H.E.J., Pulkkinen T.I.* Coronal mass ejections and their sheath regions in interplanetary space // *Living Rev. Sol. Phys.* 2017. 14:5.  
<https://doi.org/10.1007/s41116-017-0009-6>
8. *Bruce T., Tsurutani, Gurbax S. Lakhina, Rajkumar Hajar.* Space Weather Forecasting: What We Know Now and What Are the Current and Future Challenges? // *Nonlinear Processes in Geophysics. Discussion*. 2019.  
<https://doi.org/10.5194/npg-2019-38>
9. *Benacquista R., Rochel S., Rolland G.* Understanding the variability of magnetic storms caused by ICMEs // *Ann. Geophys.* 2017. V. 35. P. 147–159.  
<https://doi.org/10.5194/angeo-35-147-2017>
10. *Janvier M., Winslow R., Good S. et al.* Generic magnetic field intensity profiles of interplanetary coronal mass ejections at Mercury, Venus and Earth from superposed epoch analyses // *Space Physics*. 2019.  
<https://doi.org/10.1029/2018JA025949>
11. *Nguyen G., Aunai N., Fontaine D. et al.* Automatic Detection of Interplanetary Coronal Mass Ejections from In Situ Data: A Deep Learning Approach // *Astrophysical J.* 2019. P. 874:145.  
<https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab0d24>
12. *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. С. 99–113. (*Cosmic Research*. P. 81–94).  
<https://doi.org/10.1134/S0010952509020014>
13. *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). P. A02209.  
<https://doi.org/10.1029/2004JA010804>
14. *Yermolaev Y.I., Lodkina I.G., Nikolaeva N.S., Yermolaev M.Y.* Dynamics of large-scale solar wind streams obtained by the double superposed epoch analysis // *J. Geophys. Res.: Space Physics*. 2015. V. 120. № 9. P. 7094–7106.  
<https://doi.org/10.1002/2015JA021274>
15. *Yermolaev Yu.I., Nikolaeva N.S., Lodkina I.G., Yermolaev M.Yu.* Specific interplanetary conditions for CIR-, Sheath-, and ICME-induced geomagnetic storms obtained by double superposed epoch analysis // *Annales Geophysicae*. 2010. V. 28. № 12. P. 2177–2186.  
<https://doi.org/10.5194/angeo-28-2177-2010>
16. *Yermolaev Y.I., Lodkina I.G., Nikolaeva N.S., Yermolaev M.Y.* Dynamics of Large-Scale Solar-Wind Streams Obtained by the Double Superposed Epoch Analysis: 2. Comparisons of CIR vs. Sheath and MC vs. Ejecta // *Solar Physics*. 2017.  
<https://doi.org/10.1007/s11207-017-1205-1>
17. *Yermolaev Y.I., Lodkina I.G., Yermolaev M.Y.* Dynamics of Large-Scale Solar-Wind Streams Obtained by the Double Superposed Epoch Analysis: 3. Deflection of the Velocity Vector // *Solar Physics*. 2018. V. 293. P. 91.  
<https://doi.org/10.1007/s11207-018-1310-9>