

Относительная частота появления и геоэффективность
крупномасштабных типов солнечного ветра.

Ю.И. Ермолаев, Н.С. Николаева, И.Г. Лодкина, М.Ю. Ермолаев

Институт Космических Исследований РАН, Москва, E-mail: yermol@iki.rssi.ru

Поступила в редакцию 27 ноября 2008г.

Абстракт

В работе исследуется относительная частота появления различных типов солнечного ветра и их геоэффективность для магнитных бурь с $Dst < -50$ нТ, как в целом за весь период времени 1976-2000 г, так и их вариации в течение 2.5 циклов солнечной активности. Исходными данными для анализа является каталог крупномасштабных типов солнечного ветра за период 1976-2000 годов (см. <ftp://ftp.iki.rssi.ru/omni/>), созданный нами на основе базы OMNI (<http://omniweb.gsfc.nasa.gov>) [1] и подробно описанный в работе [2].

Среднегодовое число различных типов событий составляет: 124 ± 81 для гелиосферного токового слоя (HCS), 8 ± 6 для магнитного облака (MC), 99 ± 38 для Ejecta, 46 ± 19 для Sheath перед Ejecta, 6 ± 5 для Sheath перед MC, и 63 ± 15 для CIR. При средней длительности событий для HCS 5 ± 2 ч, MC 24 ± 11 ч, Ejecta 29 ± 5 ч, Sheath перед Ejecta 16 ± 3 ч, Sheath перед MC 9 ± 5 ч, CIR 20 ± 4 ч, различные события наблюдаются HCS в $6 \pm 4\%$, MC в $2 \pm 1\%$, Ejecta в $20 \pm 6\%$, Sheath перед Ejecta в $8 \pm 4\%$, Sheath перед MC в $0.8 \pm 0.7\%$, CIR в $10 \pm 3\%$ времени наблюдений.

В течение 1976 – 2000 г только для 58% умеренных и сильных магнитных бурь (с индексом $Dst < -50$ нТ) имелись измерения, которые позволили определить источник в солнечном ветре. Из 464 идентифицированных магнитных бурь 31% был вызван событиями CIR, 21% - областью Sheath, ~13% - магнитными облаками MC и ~35% - событиями Ejecta. Показано, что самыми геоэффективными (~61%) являются магнитные облака (MC). В 3 раза менее геоэффективными (~20–21%) являются и события CIR, и Ejecta, имеющие область Sheath. Наименьшая геоэффективность (~8%) у событий Ejecta, не имеющих

область Sheath. Обсуждаются вариации распространенности и геоэффективности различных типов солнечного ветра в цикле солнечной активности.

PACS: 96.50.Uv, 96.50.Qx, 94.30.Lr

1. Введение

Солнечный ветер, образующийся в результате расширения солнечной короны в межпланетное пространство, демонстрирует большую изменчивость на разных временных и пространственных масштабах (см., например, [3]). В данной работе мы на основе нашего каталога крупномасштабных явлений солнечного ветра [2] исследуем вариации на масштабах от нескольких часов до 25 лет, которые в основном связаны с динамикой солнечной атмосферы. Эти вариации охватывают 3 различных интервала характерных времен: (1) глобальные вариации Солнца в цикле солнечной активности (характерное время - годы), (2) «сканирование» крупномасштабных и долгоживущих солнечных структур вследствие вращения Солнца относительно наблюдателя около Земли (недели) и (3) динамические явления на Солнце и в межпланетном пространстве (сутки). При этом необходимо помнить, что наблюдатель вблизи орбиты Земли имеет возможность измерять солнечный ветер лишь вблизи плоскости эклиптики, т.е. солнечный ветер, берущий начало на низких гелиоширотах, и поэтому некоторые глобальные явления на Солнце с учетом геометрии распространения ветра могут в определенных случаях слабо проявляться в потоках солнечного ветра. Например, частота регистрации потоков, связанных с корональными дырами или СМЕ, может не коррелировать с частотой появления корональных дыр или СМЕ на Солнце, если последние образуются на высоких гелиоширотах. Подробное описание крупномасштабных типов солнечного ветра и их связь с Солнцем могут быть найдены в сборнике статей конференции «Solar wind - 11» в 2005 [4] и нашей статье [2], а также в цитируемой там литературе. В разделе 3 настоящей

статьи будут подробно описаны частота появления и длительности различных крупномасштабных типов солнечного ветра на масштабах солнечного цикла и оборота Солнца.

Солнечный ветер является основным агентом, передающим энергию от Солнца к магнитосфере Земли и приводящим к магнитосферным возмущениям. Это свойство различных явлений быть источниками магнитосферных возмущений часто называют “геоэффективностью”. Однако в современной литературе этот термин используется в двух значениях: нужно различать геоэффективность какого-либо типа солнечного ветра - т.е. отношение числа событий данного типа, приведшие к буре, к полному числу событий этого типа – от эффективности физического процесса генерации бури – т.е. отношения «выхода» процесса, например, величины Dst индекса, к «входу», например, величине Vz компоненты ММП или параметра Акасофу. Игнорирование этих различий может приводить к некорректным выводам. Геоэффективными (в данной статье - способными генерировать магнитные бури) типами солнечного ветра являются только те, которые содержат заметную по величине и продолжительную южную ($B_z < 0$) компоненту межпланетного магнитного поля (ММП) [6-11]. Так как в стационарном солнечном ветре ММП лежит в плоскости эклиптики, то заметная компонента ММП вне плоскости эклиптики может появиться лишь в возмущенных типах солнечного ветра. Такими типами солнечного ветра являются магнитное облако (MC – magnetic cloud) и области сжатия перед быстрым MC (Sheath) и на границе взаимодействия быстрого и медленного потоков солнечного ветра (CIR – corotating interaction region) (см. обзор [12]).

Магнитное облако рождается на Солнце в результате выброса корональной массы (CME – coronal mass ejection) в виде магнитного жгута (пучка скрученных магнитных линий) и практически всегда (за исключением редкого случая, когда ось жгута направлена на север) в той или иной своей части содержит южную компоненту ММП [13,14]. В последнее время терминология в этой области немного изменилась и усложнилась: все

проявления СМЕ в межпланетном пространстве принято называть ICME (interplanetary coronal mass ejection) или Ejecta, и лишь малую их часть с большим и регулярно вращающимся ММП называют магнитными облаками MC. Доля MC в общем числе ICME изменяется в цикле солнечной активности [15]. Типы Sheath и CIR рождаются по дороге от Солнца до Земли в результате взаимодействия быстрого объема плазмы («поршня», которым в случае Sheath является магнитное облако, а в случае CIR – быстрый поток из корональной дыры) с медленным объемом плазмы. В этом случае нормальная плоскости эклиптики компонента ММП возникает за счет сжатия и деформации области взаимодействия потоков (см. например, [16]).

Изучению роли типов Ejecta/MC и CIR в генерации геомагнитных бурь посвящено большое количество работ. Геоэффективность Ejecta/MC (а также солнечных явлений) достаточно подробно описана, например, в обзорах [17, 18], а геоэффективность CIR на примере 727 событий за период 1964-2003 годы оценена в единственной работе [19] и требует подтверждения независимыми исследованиями. Хотя в литературе достаточно часто указывалось, что Sheath может генерировать магнитную бурю (см., например, обзор [12] и ссылки в нем), лишь сравнительно недавно Sheath стало предметом отдельного, глубокого изучения (см. [2, 20-26] и ссылки в них). Более того, в ряде работ [25-28] было получено, что во время Sheath процесс генерации бури оказывается более эффективным, чем во время магнитного облака (без количественной оценки геоэффективности Sheath). Тем не менее, необходимо отметить, что многие исследователи отклика магнитосферы на различные типы солнечного ветра не проводят различий между Sheath и MC/Ejecta [29-33]. В некоторых работах не учитывается тот факт, что длительности геоэффективных типов течений солнечного ветра значительно короче длительности магнитной бури (например, в недавней работе [34] показано, что длительности Sheath, MC и CIR, генерирующих магнитные бури с $Dst < -60$ нТ в период 1976-2000 годов составили 9 ± 4 (для 22 событий), 28 ± 12 (113) и 20 ± 8 (121) часов соответственно), и приводят параметры

солнечного ветра для CIR, Sheath and MC/Ejecta на интервалах 8-10 суток [29,35, 36]. На наш взгляд такие подходы некорректны и приводят к некорректным выводам, так как полученные результаты относятся не к указанному типу течения солнечного ветра, а к смеси (обычно с неизвестной пропорцией) нескольких типов.

Необходимо также указать на существование некоторых дополнительных принципиальных нерешенных вопросов, которые связаны, в основном, с методическими подходами в решении проблемы.

1. В основном исследуются только причины сильных магнитных бурь с $Dst < -100$ нТ (см., например, [23, 24], т.е. обратное соответствие от бури к межпланетному источнику, а не геоэффективность различных типов солнечного ветра, для которой нужно, чтобы исходным списком событий был список межпланетных явлений и для них нужно искать отклик в магнитосфере [37, 18].

2. Исследование только сильных магнитных бурь (см. те же работы) приводит к достаточно своеобразной статистике случаев: изучается малая часть магнитных бурь, генерированная в основном взаимодействующими магнитными облаками [38, 6], а более существенная по количеству часть менее сильных бурь вообще не анализируется [39].

3. Отсутствие анализа распространенности всех крупномасштабных типов солнечного ветра на достаточно продолжительных интервалах времени, сопоставимых с солнечным циклом.

4. Отсутствие в литературе данных об оценках геоэффективности Sheaths.

Эти недостатки мы планируем преодолеть в настоящей статье. В нашей работе [2] мы описали каталог крупномасштабных типов солнечного ветра для интервала 1976-2000 годов (см. <ftp://ftp.iki.rssi.ru/omni/>), созданный на основе базы OMNI (<http://omniweb.gsfc.nasa.gov>) [1]. Поэтому в этой статье мы опираемся на этот каталог и изучаем относительную частоту появления различных типов солнечного ветра и их геоэффективность (для магнитных бурь с $Dst < -50$ нТ) как в целом за весь период

времени, так и их вариации в цикле солнечной активности на протяжении более 2 солнечных циклов в 1976-2000 годах.

2. Методика

Наш каталог включает в себя 2 части: исходные параметры базы OMNI, дополненные рассчитанными нами некоторыми производными параметрами (например, динамическим и тепловым давлениями, плазменным бета-параметром и некоторыми другими), и результаты поточечной идентификации 8 типов крупномасштабных течений плазмы солнечного ветра - HCS, Slow, Fast, CIR, Sheath, Ejecta, MC, Rare, а также 2 типа кратковременных событий - ударную волну IS и обратную ударную волну ISA. Для выполнения задач данной работы была произведена некоторая дополнительная обработка данных.

1. Все явления типа Sheath были разделены на 2 подтипа: Sheath, предшествующие Ejecta, (Sh_E) и Sheath, предшествующие MC, (Sh_{MC}). Это разбиение полностью определяется теми критериями, которые были положены в основу выделения Ejecta и магнитных облаков MC [2].

2. Было подсчитано годовое количество явлений всех типов и подтипов. Так как продолжительность интервалов отсутствия данных по годам может варьироваться от 50 до 0%, то необходимо было привести полученные данные к единой шкале. Такая «нормировка» была сделана в предположении, что темп появления данного типа течения на интервалах наличия данных и интервалах отсутствия данных один и тот же. Если в выбранном году на интервале наличия данных t_d было зарегистрировано N_e явлений, то нормированное число данного типа явлений в данном году определялось путем умножения темпа появления данного типа явлений N_e/t_d на полную продолжительность года t_y . Определенные таким образом нормированные числа событий могут быть

нецелыми числами, а их точность тем выше, чем выше исходные величины N_e и t_d .

Ошибка может быть оценена, как $N_e^{-1/2}(t_y - t_d)/t_d$, т.е. при $N_e = 16$ и $t_d/t_y = 80\%$ ошибка будет около 6%, или в данном примере нормированное число будет приблизительно 20 ± 1 событий. Ошибка величины, выражающейся некоторой формулой из простых величин с известными ошибками, определялась как квадратный корень из суммы квадратов ошибок всех членов выражения.

3. Для определения геоэффективности был добавлен в архив список магнитных бурь с $Dst < -50$ нТ. Этот список отличался от аналогичного списка, использованного в предыдущих работах (см., например, [25-26]), тем, что в тех работах мы исследовали временной ход параметров для бурь с $Dst < -60$ нТ, так как поведение Dst индекса для бурь в диапазоне от -60 до -50 нТ очень часто немонотонно (multi-step magnetic storm), т.е. мы имеем дело с комплексами магнитных бурь, когда не успела одна слабая магнитная буря пройти полный цикл своего развития, как начинается развитие следующей бури, и причинно-следственные связи для таких бурь сильно зашумлены. Как показывает анализ, небольшое ужесточение критерия до $Dst < -60$ нТ приводит к заметному уменьшению числа таких комплексных бурь. В данной работе мы вернулись к классическому определению бурь для того, чтобы можно было сравнить полученные результаты (а они в основном включают не временной ход параметров, а количество событий) с ранее полученными результатами для бурь с $Dst < -50$ нТ.

4. Всем магнитным бурям, для которых имелись измерения параметров плазмы и магнитного поля в межпланетной среде, были поставлены в соответствие определенные типы течений солнечного ветра по следующему алгоритму. Если момент минимума Dst индекса из списка магнитных бурь попадал внутрь временного интервала события солнечного ветра или отстоял от него не более чем на 2 часа (2 точки), то этой буре присваивался соответствующий тип солнечного ветра. Отметим, что по результатам анализа 64-х интенсивных ($Dst < -85$ нТ) магнитных бурь за период 1997 – 2002 г среднее

время запаздывания между пиком Dst и южной компонентой Vz IMF составляет ~2 часа (см. [40]). Похожий результат был получен и в работах [25, 34]. То есть, 2 часа соответствует среднему времени запаздывания между пиком Dst интенсивной магнитной бури и соответствующим пиком в южной компоненте Vz ММП.

5. Там, где вычислялись средние длительности типов течений солнечного ветра, брались в расчет только те события, которые не начинались и не оканчивались отсутствием данных, т.е. длительность которых не была искажена отсутствием данных. Число таких интервалов естественно может быть меньше полного числа событий. В качестве ошибки усредненной величины в этом случае приводится среднеквадратичное отклонение.

3. Результаты

Общая характеристика состояния Солнца и магнитосферы в рассматриваемый период времени с 1976 по 2000 г приведена на рис.1.

На левой панели рис.1 показано, как меняется солнечная активность (частота появления сильных рентгеновских вспышек класса M и X), которая является главным источником наземных возмущений. На правой панели рис.1 показана сопутствующая этим вспышкам геомагнитная активность на Земле (частота появления умеренных $-100 < Dst < -50$ и сильных $Dst < -100$ нТ геомагнитных бурь) в течение интервала времени 1976-2000 г (левая вертикальная ось) и с солнечным оборотом: Каррингтоновские обороты с 1636 по 1972 (правая вертикальная ось). Такое представление позволяет проиллюстрировать возможную причинно-следственную связь между этими явлениями, наблюдаемыми в разных пространственных областях – солнечных вспышек на Солнце и магнитных бурь на Земле; а также выявить и отделить долгоживущие, или повторяющиеся с солнечным оборотом (т.е. коротирующие), явления, как на Солнце, так и на Земле.

На левой панели видна вариация годового распределения рентгеновских вспышек умеренной (класс M, серые интервалы) и сильной (класс X, черные интервалы) интенсивности с циклом солнечной активности: наибольшее число рентгеновских вспышек наблюдается вблизи максимумов солнечной активности 21, 22 и 23 циклов (скопление точек вблизи 1979-1982, 1989-1992 г, 1999-2000 г, соответственно). Аналогичное поведение с циклом солнечной активности наблюдается и у геомагнитной активности (величины Dst индекса), особенно у сильных магнитных бурь с $Dst < -100$ нТ (правая панель, черные интервалы). Однако попытки сопоставить отдельные события на Солнце и Земле оказываются в большинстве случаев безрезультатными, указывая на сложную и неоднозначную связь между вспышками и бурями [41]. Кроме того, на правой панели хорошо видно, что некоторые магнитные возмущения (в частности, бури умеренной интенсивности - серые интервалы) повторяются или существуют в течение нескольких последовательных оборотов Солнца, то есть, возможно, являются рекуррентными бурями.

Солнечный ветер является посредником, передающим изменения в солнечной активности на Землю, вызывая разной силы геомагнитные бури, а также множество других явлений как внутри магнитосферы, так и на Земле. Используя каталог событий солнечного ветра и список умеренных и сильных магнитных бурь за период 1976 – 2000 г [2], мы провели статистический анализ частоты появления разных типов солнечного ветра, как за весь период времени, так и с циклом солнечной активности (раздел 3.1). Кроме того, мы проанализировали распределение длительностей каждого типа солнечного ветра, оценили среднюю величину длительности и вариацию среднегодовой длительности с циклом солнечной активности, а также соотношение между длительностями разных типов событий (раздел 3.2). Мы также исследовали для разных типов событий, как меняется величина геоэффективности с циклом солнечной активности (раздел 3.3).

3.1 Частота появления крупномасштабных событий солнечного ветра.

Число разных типов солнечного ветра, измеренных за год, и их вариация с изменением солнечной активности в течение 1976 – 2000 г, или 2.5 цикла солнечной активности (21-й, 22-й и половина 23-го цикла) представлена на рис.2. Число событий каждого типа оценивалось по числу интервалов данного типа событий в году.

Представленные на рис.2 события Fast и Slow относятся только к интервалам времени, не связанными с другими событиями. На каждой панели слева указано общее число N событий каждого типа, справа - показано среднее годовое число событий каждого типа (<тип>) со средним квадратичным отклонением (sd). Хотя число событий для отдельных лет на рис.2 может быть искажено отсутствием измерений параметров плазмы и ММП (межпланетного магнитного поля), ниже мы приводим некоторые тенденции их изменения в солнечном цикле. Однако к этим результатам надо относиться с осторожностью, и далее (рис.6) мы возвращаемся к этому вопросу после нормировки годовых чисел событий.

Как видно на рис.2, наиболее редким типом событий являются события RARE – всего 18 событий за весь период с 1976 по 2000 г. События данного типа, в основном, наблюдаются вблизи максимумов солнечных пятен, причем половина событий (9) наблюдалась в 21-м цикле, 8 событий – вблизи максимума 22-го цикла и 1 событий – в начале 23-го цикла солнечной активности (см. рис2з).

Также не частыми событиями являются магнитные облака MC– всего 101 событие MC почти за 2.5 цикла солнечной активности, и также связанный с ним подтип - события Sh_{MC} - только 79 событий MC имеют область Sheath (рис.2 ж, д, соответственно).

Наибольшее число событий MC наблюдается на фазе роста солнечного цикла солнечной активности. Например, годовое число событий MC составляет 2 – 4 события в минимуме солнечной активности, и достигает 12-ти и 15-ти на фазах роста 21-го и 23-го циклов

солнечной активности, соответственно. Однако в течение 22-го цикла событий MC было очень мало, и максимальное число событий MC не превышает 4-х событий в год.

Наиболее часто встречается гелиосферный токовый слой HCS: 1440 событий за весь период (рис.2б). В течение нескольких циклов солнечной активности годовое число этих событий меняется на порядок, от ~10 (вблизи максимума 22-го цикла) до 220 событий в год (вблизи минимума между 22-м и 23-м циклами). Можно сделать вывод, что события с HCS чаще наблюдаются вблизи минимума пятен.

Остальные типы течений встречаются примерно одинаково часто: события CIR – от 18 до 42 событий в год (Рис.2в), события Sh_{Ej} (области Sheath у Ejecta) от 8 вблизи минимума до 40 событий вблизи максимума цикла (рис.2г), события Sh_{MC} (области Sheath у MC) от 1-2 событий вблизи минимума до 8 и 11 на фазе роста 21 и 23 циклов (до 4-х событий на фазе спада 22-го цикла) (рис.2д), события Ejecta от 22-40 событий вблизи минимума до 51-93 событий вблизи максимума солнечной активности (рис.2е). События Fast – от 30 до 100 событий в год, а события Slow – от 30 до 130 событий в год (рис.2и, к). Хотя временные изменения числа событий разного типа велики (в 3 – 5 раз), однако не все типы событий имеют вариации, синхронизованные с солнечным циклом активности.

Из 9-ти типов событий, представленных на рис.2, только 5 типов событий, HCS, Sheath (оба подтипа Sh_{MC} и Sh_{Ej}), Ejecta, MC имеют выраженную зависимость от цикла солнечной активности или числа пятен. В то время как для событий CIR, Slow и Fast зависимость от цикла активности более слабая или отсутствует.

Оба типа событий Ejecta и MC преобладают на фазе роста, включая максимум цикла. Однако статистика событий MC почти в 10 раз меньше, чем Ejecta, и можно говорить лишь о тенденциях.

События Sheath, которые предшествуют событиям Ejecta и MC, характеризуются четкой зависимостью от цикла солнечной активности. Во-первых, они встречаются достаточно часто, около 48,1% всех событий Ejecta имеют область Sheath (543 событий

Sh_E из 1128 событий Ejecta). Доля событий Sh_{MC} перед магнитными облаками еще выше и составляет около 78.2% (79 событий Sh_{MC} из 101 события MC). Во-вторых, подтип событий Sh_{MC} чаще всего наблюдается на фазе роста или спада цикла, а подтип Sh_E чаще наблюдается вблизи максимума активности. Возможно, что смещение пиков событий MC, имеющих Sheath, относительно пика Ejecta с Sheath связано с небольшой статистикой событий MC такого типа.

Следующий рис.3 аналогичен предыдущему рис.2, но показывает не число интервалов (событий) различных типов солнечного ветра в году (как на рис.2), а среднегодовую долю (по времени) каждого типа солнечного ветра, т.е. отношение длительности наблюдения типа солнечного ветра к полной длительности наблюдений (полной длительности интервалов с измерениями плазмы и магнитного поля) в году. Таким образом, весь период времени с 1976 по 2000 г, когда были данные плазмы и магнитного поля, можно разделить на разные типы течений солнечного ветра: примерно 6% всего времени наблюдался тип HCS, ~10% времени занимали события CIR, 8% времени наблюдалась область Sheath перед Ejecta, менее 1% (~0.8%) времени относится к области Sheath перед MC, около 20% всего времени приходится на долю событий Ejecta, но ~2% времени на магнитные облака MC. То есть, выделенные нами типы солнечного ветра занимают только 48% всего времени, когда были данные плазмы и магнитного поля. Остальные 52% всего времени наблюдения не были связаны ни с одним из рассмотренных выше типов солнечного ветра. Из этого неидентифицируемого солнечного ветра 21% времени приходится на быстрый солнечный ветер $V > 450$ км/с (тип течений Fast), 31% времени – на медленный солнечный ветер (тип Slow).

Некоторые типы течений солнечного ветра обладают свойством повторяемости с вращением Солнца (например, события CIR), в то время как другие типы течений солнечного ветра наблюдаются независимо от вращения Солнца. Чтобы выявить рекуррентность событий, или их повторяемость с солнечным оборотом (~27 земных

суток), мы использовали представление данных, аналогичное рис.1, при котором данные о событиях (их наличие и отсутствие) представляются вдоль горизонтальной оси с днями Каррингтоновского оборота от 1 до 27, а по вертикальной оси отложены номера Каррингтоновских оборотов и соответствующие им годы.

На рис.4 показаны интервалы наблюдения событий МС (левая панель) и CIR (правая панель) в зависимости от суток солнечного вращения (ось абсцисс) в период времени 1976 – 2000 г (ось ординат). Серый цвет показывает наличие одновременных измерений параметров солнечного ветра и магнитного поля, белый цвет – пропуски в данных. Рекуррентные с периодом 27 дней события CIR проявляются как вертикальные сгустки черных отрезков на правой панели. Особенно в интервале 1994 – 2000 г, где мало дырок с отсутствием данных, можно видеть такие события CIR. Также видно, что не все события CIR, идентифицируемые нами, являются рекуррентными, а могут наблюдаться только на одном обороте. Всего было выделено 100 коротирующих событий CIR (из 717 CIR, т.е. ~14%), обладающих свойством повторяемости более, чем 2 оборота Солнца. Из них 72 события CIR регистрируются в течение 2-х последовательных оборотов Солнца (10% от всех событий CIR), 15 CIR (2% от всех CIR) – существуют 3 оборота, 10 CIR (1.4% от всех CIR) – в течение 4-х солнечных оборотов, и только по 1 событию CIR существуют в течение 5-ти, 6-ти и даже 10-ти последовательных оборотов Солнца (всего 3 события из 717 CIR, или 0.4%). Таким образом, только 14% (при учете отсутствия данных ~20%) всех событий CIR являются рекуррентными, но 86% всех зарегистрированных событий CIR (617 событий из 717 CIR), напротив, не являются рекуррентными событиями, т.к. существуют только в течение одного оборота Солнца.

Магнитные облака МС появляются в любое время независимо друг от друга (Рис.4, левая панель). Но можно видеть несколько событий МС, которые наблюдались в 2-х последовательных оборотах Солнца, например, в 1981, 1982 г, в 1998, 1999, в конце 2000

г. Всего было выделено 6 коротирующих событий МС (из 101 МС, ~6%), которые повторялись в течение 2-х последовательных оборотов. Появление таких долгоживущих магнитных облаков МС является достаточно редким событием, и требует дополнительного исследования.

На рис.5, аналогично предыдущему рис.4, показаны интервалы наблюдений всех событий МС и областей Sheath, наблюдаемых перед МС (левая панель), и всех Ejecta и прилегающих к ним областей Sheath (правая панель). Подчеркнем, что область Sheath, примыкающая к событиям МС и Ejecta, показана самым темным цветом. Интересно отметить, что события МС на рис.4, подозреваемые на рекуррентность с солнечным вращением, имеют области Sheath перед телом МС.

С другой стороны, события Ejecta, показанные на рис.5 (правая панель), также могут повторяться в течение не только 2-3-х солнечных оборотов (как это было для МС), но даже 5 – 7 оборотов. Причем такие рекуррентные события Ejecta могут и не иметь область Sheath впереди себя (см., Рис.5, правая панель, 1997 г, то есть вблизи минимума активности). В то же время в 1980 г рекуррентные события Ejecta имеют область Sheath (вблизи максимума активности). Более того, рекуррентных событий Ejecta, как с Sheath, так и без него, больше, чем рекуррентных событий CIR. Частично это объясняется большей статистикой событий Ejecta по сравнению с CIR (717 CIR против 1128 Ejecta).

Чтобы учесть пропуски в исходных данных и привести полученные результаты к единой шкале, была сделана нормировка (см. раздел 2). На рис.6 показано годовое распределение количества тех же 9-и типов солнечного ветра, но нормированных на процент времени, когда возможна идентификация типов течений, т.е. когда есть одновременные данные для скорости и магнитного поля. Бары показывают возможную погрешность (неопределенность) для нормированного числа событий.

В результате нормировки изменилось не только общее число событий каждого типа, но и величина вариаций годовых чисел некоторых типов событий, что сказалось на

их поведении в зависимости от цикла активности. Например, после нормировки появилась более выраженная тенденция зависимости числа событий типа CIR от цикла солнечной активности – более часто события CIR появляются на спаде цикла солнечной активности вблизи минимума активности, но реже вблизи максимума активности (Рис.6в). До нормировки эта зависимость была слабо выражена. Однако большая величина неопределенности позволяет говорить лишь о тенденции этой зависимости.

В то же время события Sheath (оба подтипа Sh_E , Sh_{MC}) после нормировки проявляют более слабую зависимость от цикла солнечной активности, чем до нормировки (рис.6г,д). Остается преобладание этих событий Sheath вблизи фазы роста (для Sh_{MC}) и максимума солнечной активности (Sh_E), но эта тенденция очень слабая и менее выраженная, чем для событий без нормировки. Напомним, что статистика событий Sh_{MC} мала (в ~ 7 раз меньше, чем у Sh_E), а неопределенности велики и по величине сопоставимы со средним годовым значением.

Можно предположить, что нормированное число событий Ejecta, включающих все подтипы, имеют по два максимума в каждом цикле (рис.6е): число событий возрастает на фазах роста и спада солнечной активности. В то же время для нормированных событий MC пики наблюдаются в начале фазы роста солнечной активности (рис.6ж). Также можно предположить, что после нормировки появилась тенденция преобладания медленного потока вблизи максимума солнечной активности, а быстрых потоков вблизи минимума солнечной активности.

На следующем рис.7 в логарифмическом масштабе показана вариация отношений нормированных годовых чисел разных типов и подтипов событий: (б) всех событий ($MC/Ejecta$), (в) подтип Ejecta с Sheath ко всем Ejecta ($Sh_E/Ejecta$), (г) подтип MC с Sheath ко всем MC (Sh_{MC}/MC) и (д) подтипы MC и Ejecta оба с Sheath (Sh_{MC}/Sh_E), (е) тип Ejecta к событиям CIR ($Ejecta/CIR$), (ж) события MC к событиям CIR (MC/CIR). На рис.7а показана вариация годовых чисел пятен. Справа на каждой панели (б – ж) приведены

годовые отношения, усредненные за весь период времени с 1976 по 2000 г (также показаны пунктирными линиями), и их разброс (sd). Бары на рис.7 показывают возможные ошибки отношений числа событий (см. раздел 2).

На рис.7б видно, что события МС наблюдаются значительно реже, чем события Ejecta. За весь период времени средняя годовая доля МС по отношению к событиям Ejecta составляет около ~8% (с разбросом 5%). В течение всего времени годовая доля событий МС по отношению к событиям Ejecta меняется в 4 раза и составляет 5% и 22%. Отметим, однако, что из-за большого разброса (величина которого сопоставима с величиной самого отношения) можно только предположить тенденцию того, что частота появления МС (по отношению к Ejecta) имеет 2 пика: она возрастает вблизи спада и подъема солнечной активности (и составляет 10 – 22%), но понижается в ~4 раза вблизи минимума и максимума солнечной активности (до 2 – 9%). То есть, на фазах спада и подъема солнечного цикла доля МС по отношению к Ejecta в 2 раза выше, чем на минимуме и максимуме солнечного цикла.

Насколько часто встречаются области Sheath перед событиями Ejecta, иллюстрирует рис.7в. Видно, что в течение всего времени доля событий Sheath у Ejecta Sh_E относительно полного числа событий Ejecta, меняется более чем в 3 раза между 25% и 85% (рис.7в). В среднем за весь период времени около половины всех событий Ejecta имеет область Sheath, $\langle Sh_E/Ejecta \rangle \sim 0.47 \pm 0.12$ (см. Рис.7в). Однако возможные погрешности годовых отношений очень велики особенно в 22-м цикле солнечной активности из-за длительных интервалов отсутствия данных. Можно предположить тенденцию роста числа событий Ejecta, имеющих область Sheath, вблизи максимума солнечной активности. Например, для 21-го цикла отношение меняется с ~35% сразу после минимума до ~80% сразу после максимума. Более слабая зависимость наблюдается для 22-го цикла (с 30% в минимуме до 50% в максимуме), но возможные погрешности особенно велики (см. бары). Для 23 цикла, возможно, что доля событий Ejecta с областью

Sheath возрастает с 40% вблизи минимума до 90% вблизи максимума солнечных пятен.

Таким образом, можно предположить, что события Ejecta с областью Sheath в 2 раза чаще появляются вблизи максимума солнечного цикла.

Рис.7г показывает долю событий MC с областью Sheath относительно всех событий MC. За весь период времени среднее значение отношение составляет $\langle Sh_{MC}/MC \rangle = 0.72 \pm 0.35$, то есть около 70% (но с большим разбросом) событий MC имеют область Sheath. Частота появления событий MC, имеющих область Sheath, меняется между 55% до 100% в течение всего периода времени. Очень часто, например, 1990 – 1993 г, доля Sheath от всех событий MC составляет 100%, то есть все MC имеют область Sheath. Причем максимальная доля до 100% событий Sheath перед MC наблюдается на фазах подъема и спада солнечной активности, а вблизи минимума активности доля событий MC, имеющих область Sheath, уменьшается до 55-65%. Однако возможные погрешности отношений очень большие, статистика событий MC - невелика, и можно только предположить тенденцию раздвоения пика вблизи максимума (то есть, частота появления событий Sheath и у MC, и у Ejecta возможно имеет 2 пика: на восходящей и нисходящей части цикла солнечной активности).

Рис.7д показывает вариацию отношения числа событий Sh_{MC}/Sh_E , Sheath у MC (Sh_{MC}) к числу событий Sheath у Ejecta (Sh_E). В среднем за весь период времени среднегодовое отношение $\langle Sh_{MC} / Sh_E \rangle \sim 0.14 \pm 0.1$, то есть среднегодовая доля событий Sheath у MC составляет примерно 14% относительно событий Sheath, примыкающих к Ejecta. В течение ~3-х солнечных циклов величина отношения этих типов событий меняется в широком диапазоне между 8% и 35%, то есть более чем в 4 раза. Количество событий Sheath, примыкающих к Ejecta, существенно превышает число событий Sheath, примыкающих к MC, как минимум в 3 раза, и доходит до 12 раз. Однако из-за большого разброса отношений зависимость от цикла солнечной активности не просматривается. Требуется большая статистика событий.

На рис.7е показано, как меняется по годам отношение числа событий Ejecta к CIR (Ejecta/CIR). Годовое отношение, усредненное за весь период 1976 – 2000 г, составляет $\langle \text{Ejecta/CIR} \rangle = 1.63 \pm 0.5$, то есть количество событий Ejecta превышает число событий CIR более чем в 1.5 раза. Из-за большого разброса можно только предположить, что отношение числа событий Ejecta/CIR зависит от цикла солнечной активности: – оно максимально и превышает среднее отношение ($\text{Ejecta/CIR} > 1.63$) на фазе роста солнечной активности, и минимально и ниже среднего отношения ($\text{Ejecta/CIR} < 1.63$) на фазе спада цикла активности, включая минимум.

Рис.7ж иллюстрирует соотношение между годовым количеством событий MC и CIR. При усреднении за весь период времени отношение $\langle \text{MC/CIR} \rangle = 0.14 \pm 0.13$, то есть в среднем число MC событий составляет только 14% от событий CIR. Но видна вариация с циклом активности, и отношение MC/CIR меняется от 0.03 до 0.8 с максимумом на фазе подъема солнечного цикла (особенно для 21 и 23 циклов) и минимумом на фазе спада (21 и 22 циклов). Однако большой разброс в величинах отношения MC/CIR, величина которых сопоставима с величиной самого отношения, не позволяет сделать окончательный вывод, и можно говорить лишь о тенденциях изменений. Требуются дополнительные исследования.

3.2. Распределение длительностей событий разных типов солнечного ветра.

На рис.8 показано распределение годовых длительностей dT (в часах) разных типов событий солнечного ветра. Справа приведены значения длительностей, усредненные за весь период времени с 1976 по 2000 г со средними квадратичными отклонениями.

Наименьшую среднюю длительность имеют события HCS: $\langle dT_{\text{HCS}} \rangle = 4.98 \pm 2.29$ час. Наибольшая длительность наблюдается у событий Ejecta, MC, CIR, и составляет десятки часов и даже сутки: $\langle dT_{\text{Ejecta}} \rangle = 29.12 \pm 5.20$ час, $\langle dT_{\text{MC}} \rangle = 24.6 \pm 11.67$ час,

$\langle dT_{CIR} \rangle = 20.17 \pm 4.05$ час, соответственно. Средняя длительность событий MC и Ejecta приблизительно одинаковая (~1 сутки). В то же время средняя длительность Sheath у событий MC ($\langle dT_{ShMC} \rangle = 9.48 \pm 5.69$ час) почти в 1.5 раза короче, чем у Ejecta ($\langle dT_{ShE} \rangle = 16.10 \pm 3.71$ час).

Как видно на рис. 8(г,д) в течение 2.5 циклов солнечной активности средняя годовая длительность Sheath у событий MC меняется в 4 раза (dT_{ShMC} от 5 до 20 час), а длительность Sheath у Ejecta – в 2 раза (dT_{ShEj} от 20 до 40 час).

С изменением фазы цикла солнечной активности длительность HCS меняется между 3 и 12 час, или в 4 раза, с пиком вблизи минимума и начала фазы роста солнечного цикла. Однако разброс длительности разных типов событий велик и часто сопоставим с величиной самой длительности (см. бары на рис.8б). Аналогичная ситуация наблюдается для всех типов событий, представленных на рис.8 (б-з). Можно предположить, что из-за высокого разброса, длительности всех рассматриваемых событий не зависят от цикла солнечной активности или эта зависимость слабая.

Вариация в логарифмическом масштабе отношений длительностей для разных типов событий и их подтипов представлена на рис.9. Пунктирная линия на каждой панели показывает отношение длительностей, полученное по годовым усреднениям за весь период времени (цифры справа на панелях).

Рис. 9б показывает соотношение между годовыми длительностями событий MC и Ejecta (включая все подтипы) в течение 21 – 23 циклов солнечной активности. Видно, что в среднем длительность событий MC близка к длительности событий Ejecta, среднее отношение $\langle dT_{MC}/dT_E \rangle = 0.85 \pm 0.49$, то есть средняя длительность MC составляет 85% от длительности Ejecta, но с большим разбросом (49%). В течение всего времени отношение годовой длительности MC к годовой длительности событий Ejecta меняется между 0.5 (только 1 событие MC было в 1990 г) и 1.3, и только в 1993 г оно составляет 2.5 (только 1 событие MC было в 1993 г). Учитывая большой разброс, можно предположить, что

длительность событий МС почти совпадает с длительностью событий Ejecta (на 15% короче), и не меняются с циклом солнечной активности.

Рис.9в показывает, как соотносится длительность Sheath у Ejecta с длительностью самих событий Ejecta (всех подтипов). Средняя длительность Sheath всегда меньше, чем длительность событий Ejecta (в среднем в 2 раза, т.к. отношение длительностей $\langle dT_{\text{SHEj}}/dT_{\text{Ej}} \rangle \sim 0.57 \pm 0.15$). С циклом активности соотношение между длительностями событий Sheath и Ejecta меняется в 2 раза от 0.4 до 0.8. Однако из-за большого разброса зависимость от солнечного цикла либо отсутствует, либо очень слабая.

Рис.9г показывает вариацию отношения между длительностью Sheath у МС и МС (всех типов). Видно, что для событий МС длительность Sheath также значительно меньше длительности МС, за исключением 1987 (только 1 событие МС было в 1987 г) и 1991г (4 события МС, и все имели область Sheath), когда длительность Sheath превысила длительность МС в 1.2 и в 2.5 раза, соответственно. Однако в среднем за весь период времени отношение длительностей составляет $\langle dT_{\text{SHMC}}/dT_{\text{MC}} \rangle = 0.46 \pm 0.53$, то есть длительность Sheath примерно в 2 раза меньше длительности МС, но с большим разбросом, близким к величине отношения длительностей. Из-за малой статистики событий МС, разброса величин длительностей МС и связанных с этим больших погрешностей отношений длительностей области Sheath и самих МС, трудно говорить о какой-либо зависимости отношения длительности от фазы солнечного цикла.

Рис.9д показывает соотношение между годовыми длительностями областей Sheath перед событиями МС и перед событиями Ejecta ($dT_{\text{SHMC}}/dT_{\text{SHEj}}$). В среднем годовая длительность Sheath у событий МС составляет примерно половину длительности Sheath перед Ejecta ($\langle dT_{\text{SHMC}}/dT_{\text{SHEj}} \rangle = 0.6 \pm 0.4$), но с большим среднеквадратичным отклонением. В разные годы соотношение между длительностями Sheath у событий МС и Ejecta может сильно меняться: от очень высокого значения $dT_{\text{SHMC}}/dT_{\text{SHEj}} = 1.5$ (в 1977 г) до очень низкого $dT_{\text{SHMC}}/dT_{\text{SHEj}} = 0.25$ (в 1996 г). Но из-за большого разброса, сопоставимого с

величиной отношений, можно предположить, что зависимость от цикла солнечной активности отсутствует или очень слабая.

На следующем **рис.10** представлены отношения среднегодовых длительностей Sheath, примыкающих по времени к событиям MC (рис.10б) и к событиям Ejecta (рис.10в), т.е. только для подклассов Ejecta с Sheath и MC с Sheath. Причем на **рис.10** отношения длительностей оценивались по отношению усредненных за год длительностям.

Как видно на рис.10б, длительность Sheath, в среднем, меньше длительности, примыкающего к нему MC почти в 2 раза (см. отношение длительностей за весь период справа). В течение всего времени длительность Sheath может меняться в широких пределах: от 0.1 до 0.8 от длительности примыкающего MC, за исключением 1987 и 1990 г, когда длительность Sheath превысила длительность примыкающего к нему MC в 1.2 и 2.7 раз, соответственно. Разброс отношений длительностей очень велик, поэтому зависимость от фазы солнечного цикла отсутствует или очень мала. Отметим, что данные, представленные на рис.10б (для отношений длительности Sheath к длительности, примыкающего к нему MC), почти не отличаются от рис.9г (отношение длительности Sheath к длительности всех MC). Хотя статистика событий MC и подтипа MC с Sheath разная (101 событие и 79 событий, соответственно), но это не повлияло сильно на ход временной зависимости годовых отношений.

Как видно на Рис.10(в), длительность Sheath также меньше длительности, примыкающего к нему Ejecta, за исключением 1987 и 1993 г, когда отношение длительностей было близким к 1 (около 0.95 и 1.1, соответственно). В среднем, длительность Sheath составляет чуть больше половины от длительности Ejecta ($\langle dT_{\text{SHEj}} \rangle / \langle dT_{\text{Ejecta}} \rangle = 0.61 \pm 0.18$). В течение всего времени длительность Sheath менялась между 0.4 и 1.1 от длительности примыкающего к ней Ejecta. С учетом большого разброса можно предположить, что отношение длительности Sheath к длительности,

примыкающего к нему события, практически одинаковое как у событий MC, так и у Ejecta, и не зависит от солнечного цикла, или эта зависимость очень слабая.

Следующий рис.11 показывает зависимость между длительностями событий Sheath и примыкающим к ним событиям MC (рис.11а) и Ejecta (рис.11б), но отдельно для 2-х групп событий, различающихся величиной скорости плазмы $V < 450$ км/с (серые точки) и $V > 450$ км/с (черные точки) в начале MC и Ejecta, следующих за Sheath (скорость оценивалась по первой среднечасовой точке внутри событий MC и Ejecta).

На рис.11а видно, что длительность Sheath, примыкающего к событию MC, не зависит от длительности самого MC для обеих групп скоростей MC. Аналогично длительность Sheath, примыкающего к Ejecta, не зависит от длительности самого Ejecta независимо от скорости плазмы передней части события Ejecta (рис.11б). В частности, длительность отдельных событий MC может меняться в широких пределах между ~10 час и несколькими сутками (50-60 час), но даже в случае относительно малой длительности самого тела MC около ~10 час длительность области Sheath перед ним может меняться в очень широком диапазоне от 4 час до суток. Аналогичная ситуация наблюдается и для событий Ejecta.

Таким образом, длительности отдельных событий у разных типов солнечного ветра меняются в очень широком диапазоне от нескольких часов до нескольких суток. В среднем за год наименьшая длительность ~5 часов у событий HCS, Rare, и самая большая годовая длительность ~30 часов у событий Ejecta. Однако разброс велик, и средние квадратичные отклонения по величине сопоставимы с величиной самой длительности, поэтому трудно говорить о вариациях с солнечным циклом. В среднем за весь период длительность MC меньше длительности Ejecta и составляет ~85% от длительности Ejecta. Но при среднем квадратичном отклонении отношения длительностей $sd \sim 0.5$ можно предположить равенство длительностей. У событий Ejecta длительность Sheath составляет примерно 57% от длительности Ejecta (то есть немного больше половины). У событий MC

длительность Sheath составляет примерно 46% длительности MC (то есть, немного меньше половины). С учетом разброса, который выше у событий MC, можно предположить, что длительность Sheath у обоих типов событий MC и Ejecta одинакова и составляет ~50% от их длительности. Среднее отношение длительностей Sheath у MC и у Ejecta равно 0.6 ± 0.4 , то есть длительность Sheath перед MC примерно в 2 раза короче, чем перед Ejecta (составляет 60% от длительности Sheath у Ejecta, но с большим разбросом). Аналогичное соотношение между длительностями области Sheath и событий MC и Ejecta, примыкающим к ним (0.46 перед MC, и 0.61 перед Ejecta). Длительность Sheath у MC и Ejecta не зависит от длительности, примыкающего к нему MC и Ejecta. Причем на отсутствие зависимости длительности Sheath от длительности примыкающих к ним MC и Ejecta, не влияет величина скорости плазмы солнечного ветра внутри примыкающих событий MC и Ejecta.

3.3 Геоэффективности событий солнечного ветра.

В данной работе оценивалась геоэффективность разных типов солнечного ветра по отношению к магнитным бурям умеренной и сильной интенсивности, т.е. имеющим величину $Dst < -50$ нТ в минимуме индекса. Величина геоэффективности каждого типа событий определялась, как отношение числа событий, приведших к магнитным бурям, к полному числу событий данного типа. Предполагается, что событие солнечного ветра приводит к магнитной буре, если минимум Dst попадает внутрь интервала события или следует за ним в течение не более 2-х часов.

Всего за весь период времени было выделено 798 умеренных и сильных магнитных бурь с интенсивностью $Dst < -50$ нТ. Но только для 464 магнитных бурь (т.е. 58% всех магнитных бурь) было найдено соответствующее событие в солнечном ветре. Источник остальных 334 магнитных бурь (т.е. 42% из 798-ми бурь) оказывается неопределенным, и,

в основном, это связано с отсутствием данных по плазме и межпланетному магнитному полю, и невозможностью идентификации типа солнечного ветра для этого интервала.

В таблице 1 приведено: полное количество событий разных типов CIR, Ejecta и MC (каждого подтипа) (2-я колонка), число магнитных бурь, вызванных данным типом событий (3-я колонка), значения суммарных (за весь период 1976 – 2000 г) геоэффективностей для соответствующего типа событий (4-я колонка).

Из таблицы 1 следует, что 145 магнитных бурь были вызваны событиями CIR, что составляет 31.2% от 464 магнитных бурь, для которых были идентифицированы соответствующие им типы солнечного ветра; 96 магнитных бурь (т.е. 20.7%) вызваны событиями Sheath (12 магнитных бурь, т.е. 2.6%, возникли от области Sheath перед MC, Sh_{MC} и 84 магнитные бури, т.е. 18.1% – от области Sheath перед Ejecta, Sh_E); 62 магнитные бури (13.4%) связаны с магнитными облаками MC (причем 50 бурь от MC с Sheath (10.8%), и 12 от MC без Sheath (2.6%)); 161 магнитные бури (34.7%) вызваны событиями Ejecta (115 (24.8%) от Ejecta с Sheath, 46 (9.9%) от Ejecta без Sheath). Таким образом, в среднем $\sim 1/2$ магнитных бурь вызваны событиями Ejecta и MC, $\sim 1/3$ магнитных бурь вызвана CIR, и $\sim 1/5$ часть бурь вызвана областью Sheath.

Как видно из таблицы 1, суммарная геоэффективность событий CIR составляет всего 20.2%. Такая же величина геоэффективности 20.4% и у событий Ejecta, имеющих Sheath, в то же время у событий Ejecta без области Sheath геоэффективность составляет всего 8%. Наибольшая геоэффективность 63.3% и 54.5% наблюдается для событий MC с Sheath и MC без Sheath, соответственно. Примерно одинаковая величина геоэффективности 15% у области Sheath, примыкающей как к MC, так и к событиям Ejecta.

Отметим, что за весь период времени с 1976 по 2000 г зарегистрировано примерно одинаковое число событий Ejecta с Sheath и без него (563 и 575 событие, соответственно). Однако магнитные бури вызываются чаще событиями Ejecta с Sheath, чем без Sheath (115

событий против 46 событий). Таким образом, события Ejecta с Sheath в 2.5 раза более геоэффективны, чем события Ejecta без Sheath. В то же время, большинство MC событий имеют область Sheath (79 событий против 22), но это мало влияет на величину их геоэффективности, которая составляет 63% и 54%, соответственно. То есть, событий MC с Sheath почти в 4 раза больше, чем без Sheath, но суммарная геоэффективность MC с Sheath лишь на 8% выше, чем MC без Sheath.

На рис.12 показано изменение по годам: (а) солнечных пятен, (б) геомагнитных бурь с $Dst < -50$ нТ, и геоэффективностей событий: (в) CIR, (г) Sheath, примыкающих к MC, SH_{MC} (черные гистограммы) и к Ejecta, SH_E (серые гистограммы), (д) MC, имеющих Sheath (черные) и MC без Sheath (серые), (е) Ejecta, имеющих Sheath (черные), и Ejecta без Sheath (серые), соответственно. Справа от панелей (в–е) приведены суммарные (за весь период) значения геоэффективностей для каждого типа событий.

На рис.12б показана частота появления магнитных бурь (с минимумом индекса $Dst < -50$ нТ) в течение 1976 – 2000 г. Видна корреляция годового количества магнитных бурь с солнечной активностью (рис.12, панели (а) и (б)). Вблизи максимума солнечных пятен количество магнитных бурь (~50–60) в 4–5 раз превышает их число вблизи минимума (~8–15). Более того, есть тенденция расщепления пика на 2, то есть, максимальное число магнитных бурь с интенсивностью $Dst < -50$ нТ, наблюдается в конце фазы роста и начале фазы спада цикла солнечной активности. Подобное раздвоение пика вблизи максимума солнечной активности для числа пятен, известное как эффект Гневывшева, описано в работах [42, 43]. Позднее было показано, что солнечная активность (в разных проявлениях: пятна, CME, реверсы полярного поля на Солнце) характеризуется не одним пиком, но наблюдается множественная структура максимума, состоящего из 2-3 пиков, что связано, возможно, с перестройкой структуры магнитного поля Солнца в полярных областях вблизи максимума солнечной активности [44]. Отметим, что более мощные и устойчивые явления появляются во время 2-го максимума, в то время как 1-й

максимум характеризуется многочисленными, но слабыми событиями. Удобное положение 2-го максимума (низкие широты) для Земли делает его более важным для солнечно-земных связей [43].

Как видно на рис.12(в), годовая геоэффективность событий CIR меняется в широком диапазоне от $<0.05-0.1$ в минимуме солнечной активности до почти ~ 0.4 в разные периоды разных циклов активности. Так на 22-м цикле активности можно предположить существование 2-х пиков геоэффективности CIR: 1-й пик вблизи максимума солнечной активности и 2-й пик на фазе спада солнечной активности. В то же время в 21-м и 23-м циклах активности наблюдается только 1 пик в геоэффективности событий CIR, но в разные периоды: на фазе спада 21-го цикла, и фазе подъема 23-го цикла активности. Более четкой и однозначной зависимости геоэффективности событий CIR от цикла солнечной активности не просматривается.

События Sheath (Рис.12 г) могут сопровождать как MC (черные гистограммы), так и Ejecta (серые гистограммы). Как видно на рис.12 (г), годовая геоэффективность Sheath у событий Ejecta ниже, чем у MC, и не превышает 0.4. В то время как у событий MC геоэффективность Sheath может быть очень высокой и достигать 1 (например, 1990 год, когда было всего 3-4 событий MC, и все они вызвали бурю). С другой стороны, если исключить этот год, то геоэффективность событий Sheath, примыкающих к событиям MC, не превышает 0.5. Более того, суммарная (за все время) геоэффективность области Sheath, как для событий MC, так и для событий Ejecta, практически одинаковая, и составляет 0.152 и 0.149, соответственно. Как можно видеть из таблицы 1, общее количество магнитных бурь, вызванных областью Sheath, составляет 96 (из них 12 бурь связаны с Sheath, примыкающей к MC, а 84 бури вызваны Sheath, примыкающей к Ejecta) из всех 642 (79+563) событий Sheath, сопровождающих оба типа MC и Ejecta. Тогда суммарная геоэффективность всех событий Sheath (сопровождающих MC и Ejecta) составляет 15%.

Как видно на рис.12 (д), годовые значения геоэффективностей для событий МС обоих подтипов (79 событий МС с Sheath и 22 события МС без Sheath) меняются в диапазоне от 0.3 до 1, или в 3 раза. Однако из-за малой статистики событий годовое число событий МС без Sheath, используемое для расчета геоэффективности, обычно невелико и составляет около 1-3 события, и только в 1978 г зарегистрировано 6 событий (из них 3 события привели к магнитной буре, что соответствует геоэффективности 0.5). Поэтому годовая геоэффективность этих событий МС без Sheath, равная 1, оценивалась по 1 – 2 событиям этого типа. Для событий МС с Sheath годовое число событий менялось от 1 до 11 событий. Поэтому значение годовой эффективности, равной 1, оценивалось по 2 – 4 событиям данного типа. То есть, события МС в основном имеют область Sheath (из общего числа 101 событий МС: 79 событий имеют Sheath против 22-х событий МС без Sheath, или 78% против 22%). Из-за малой статистики событий МС можно только предположить тенденцию в вариации геоэффективности МС с циклом солнечной активности аналогичную событиям Ejecta, подтипом которых являются магнитные облака МС (см. ниже).

На рис.12(е) представлены годовые распределения геоэффективностей 2-х подтипов событий Ejecta: с Sheath (черные гистограммы), без Sheath (серые гистограммы). Величина годовой геоэффективности событий Ejecta с Sheath с циклом солнечной активности меняется в несколько раз: от значений ~0.1 вблизи минимума солнечных пятен до значений около 0.4 на фазе спада вблизи максимума. Более того, можно предположить раздвоение пика вблизи максимума, как для магнитных бурь, т.е. существование 2-х пиков геоэффективности Ejecta - на фазах подъема и спада циклов солнечной активности. Отметим, что годовое количество этих событий, связанных с магнитными бурями, меняется от 1 (вблизи минимума) до 17 (около максимума). То есть, геоэффективность событий выше там, где события появляются чаще. Для событий Ejecta

без Sheath наблюдается аналогичная зависимость. Но число событий в году, вызывающих бурю, значительно ниже, и меняется в диапазоне от 1 события до 6 событий.

Итак, оценки показывают, что суммарная геоэффективность за весь период времени с 1976 по 2000 г для событий CIR составляет 20.2% (из 717 событий CIR только 145 событий вызвали магнитную бурю с интенсивностью $Dst < -50$ нТ). Геоэффективность всех событий Sheath (примыкающим к MC и к Ejecta) за весь период времени с 1976 по 2000 г составляет 15.4% (из 622 событий Sheath только 96 связано с магнитными бурями). Наибольшая величина суммарной геоэффективности, равная 61.3%, у событий MC, включая оба подтипа с Sheath и без него (из 101 события MC 62 события привели к магнитным бурям). Самая низкая суммарная эффективность 14.2% у событий Ejecta, включая оба подтипа с Sheath и без него (из 1128 событий только 161 привели к магнитным бурям). Суммарная геоэффективность событий Ejecta с Sheath (21.2%) в ~3 раза ниже, чем у событий MC с Sheath (63.3%).

Отметим, что в сумме события Ejecta и MC, включая все подтипы с Sheath и без него, имеют суммарную геоэффективность, равную 18.1% (из $1128+101=1229$ событий MC и Ejecta $62+161=223$ события привели к магнитным бурям). То есть, геоэффективность 18.1% всех событий ICME (включая все подтипы Ejecta, MC, Sheath) близка к геоэффективности 20.2% событий CIR. Высокая геоэффективность событий MC, являющихся подклассом событий ICME/Ejecta, размывается при объединении этих событий с Ejecta из-за их малого количества на фоне событий Ejecta.

4. Обсуждение результатов

4.1 Статистика событий

Следует отметить, что систематического и полного исследования частоты появления разных типов солнечного ветра в течение нескольких циклов солнечной

активности до настоящего времени, по-видимому, не проводилось. Мы собрали опубликованную информацию о числе событий разных типов солнечного ветра и представили вместе с нашими данными на рис. 13. Часть информации была взята из приведенных в работах таблиц, некоторые данные о количестве событий взяты из графиков, представленных авторами статей. В зависимости от использованных методик число событий одного и того же типа может сильно различаться. Кроме того, данные разных авторов, относящиеся к одному интервалу времени, сильно расходятся, поскольку разные авторы использовали как разные наборы данных, так и разные критерии отбора событий, что могло быть связано с конкретной задачей авторов статьи.

На рис.13(а-е) в виде гистограмм показано (а) число пятен, (б-е) число событий (без нормировки) солнечного ветра CIR, Ejecta, Sh_E , MC, Sh_{MC} , соответственно, которые были получены нами из каталога (частично повтор рис.2). На гистограммы наложены данные разных авторов о числе событий разных типов течения солнечного ветра в виде точек и линий. На рис.13 видно, что наиболее полная информация, охватывающая почти весь период времени 1976 – 2000 г, существует только для магнитных облаков MC, а для других типов солнечного ветра она либо отсутствует, либо ограничена очень короткими интервалами времени.

Магнитные облака MC являются наиболее часто изучаемым типом солнечного ветра. На рис.13 (д) видно достаточно хорошее совпадение числа событий MC, выделенных нами, с данными авторов работы [45] за 1976 – 1980 г вблизи максимума 21-го цикла солнечной активности. Информация о магнитных облаках MC была получена на спутниках Helios 1/2 на расстоянии 0.3-1 а.е от Земли. Критерии отбора событий MC те же, что в работе [46], но поскольку исследовалась структура магнитных облаков, то дополнительно для всех событий MC применялся метод минимума вариаций для определения вращения вектора магнитного поля на большой угол (угол более 30°). То есть, при идентификации MC авторы этой работы использовали основное свойство MC,

отличающее его от Ejecta, – плавное изменение направления вектора поля на временных масштабах от нескольких часов до суток. Тем не менее, на рис.13д видно очень хорошее согласие между нашими данными и работой [45] за период 1976-1980 г.

По данным, взятым из другой работы [47], полное число событий МС за период с 1976 по 1993 г составило 44 МС, что в ~ 1.5 раза меньше, чем у нас (67 МС). События МС в этой работе были выделены из базы данных OMNI за большой период времени с 1965 по 1993 г с использованием основных признаков МС, описанных в работе [46]. Причем события МС со сложной вариацией магнитного поля в этой работе исключались из рассмотрения, и никакого анализа с циклом активности не проводилось. Как видно на рис. 13д, годовая частота появления МС оказалась очень низкой по сравнению с нашими данными (~6-12 МС событий в 21-м цикле).

Достаточно подробно изучено поведение частоты событий МС во время 23-го цикла солнечной активности (период 1996 – 2002 г). К сожалению, наши данные ограничены датой максимума цикла, т.е. 2000-м годом, в отличие от данных других авторов. Как видно на рис.13 (д), по нашим данным пик МС наблюдается на фазе роста 23-го цикла, что подтверждается также данными других авторов (например, [15, 48-51]). Число событий МС по нашим данным спадает вблизи максимума около 2000 г, но растет по результатам других работ [15, 48, 50, 52 53]. Подобная разница в поведении годовых чисел МС, возможно, связана с отсутствием данных в базе OMNI и неполной статистикой событий МС в 2000 г.

По нашим данным около 80% МС (79 событий из 101 МС) имеют перед собой область сжатия Sheath. На рис.13е видно, что опубликовано очень мало данных о событиях Sheath перед МС. В работе [54] приведена информация о 104 МС за период 1998-2002 г, выделенных по данным спутника ACE. За 3 года с 1998 по 2000 г авторы получили 33 события Sheath, что в 3 раза больше, чем у нас за тот же период времени (11 событий Sheath перед МС). По нашим данным суммарная за 3 года доля событий с Sheath

перед МС составляет ~73% (11 Sheath из 15 МС), что выше, чем в работе [54] ~48% (33 Sheath из 69 МС). Однако статистика событий у нас невелика, и требуются дополнительные исследования. Данные по числу Sheath перед МС за 1997-2000 г, взятые из работы [53], совпадают с данными [54]. Отметим, что в работе [53] события Sheath перед МС выделялись по ударной волне, предшествующей Sheath, кандидаты в МС имели менее строгие критерии отбора, чем группа событий МС (например, угол вращения магнитного поля был меньше 30 градусов).

События ICME (Ejecta) исследовались несколькими авторами. Например, в работах [55, 56] можно найти информацию за 1979-1988 г, то есть 21 цикл. Причем в работе [56] авторы использовали данные КА PVO (Pioneer Venus Orbiter) за 1979-1988 и Helios-1 за период 1974-1982. Цель их работы – связь солнечных СМЕ с межпланетными событиями ICME. Для этого они выбирали определенную конфигурацию спутника по отношению к линии Земля-Солнце (-90° по отношению к линии Земля- Солнце), когда один из спутников находился вблизи солнечного лимба, чтобы с помощью коронографа наблюдать СМЕ события на Солнце. А в качестве одного из признаков ICME авторы использовали критерий существенного вращения поля в течение суток, аналогичный признаку МС. В результате было выделено только 31 событие ICME за 10-ти летний период, против 424 ICME по нашим данным за тот же период времени.

В работе [55] по данным солнечного ветра на КА PVO на расстоянии 0.72 AU за 1979-1988 г было выделено 203 SIRs (stream interaction regions) и 124 ICME.

Идентификация события ICME проводилась по 3-м из 5-ти признаков (возрастание полного перпендикулярного (к магнитному полю) давления $P_t = B^2/2\mu_0 + \sum_j k T_{j,\perp}$, увеличенное поле, гладкое вращение поля, низкая температура плазмы и понижение скорости). Кроме того, авторы определяли число ICME с ударной волной, которая предшествует событиям Sheath. Число таких событий Sheath перед Ejecta показано на рис.13 (г). Видно, что годовые числа событий сильно различаются. Оценка показывает,

что соотношение между полным числом Sheath и Ejecta за период 1979 – 1988 по нашим данным составляет ~ 51%, что соответствует данным авторов [55] - 48%. То есть, примерно половина всех событий ICME/Ejecta имеют область Sheath перед собой, как по нашим данным, так и по данным авторов [55]. Отметим, что в отдельные годы доля событий ICME, имеющих область Sheath перед собой, может меняться от 28% до 70% по данным [55], что совпадает с вариацией между 26% и 70% по нашим данным.

На рис.13в видно разное поведение Ejecta у нас, и ICME событий у авторов работы [48]. Отметим, что в работе [48] при идентификации событий ICME за период 1996-2002 г использовался дополнительный критерий, связанный с понижением интенсивности галактических космических лучей. По нашим данным наибольшее число событий Ejecta появляется на фазе роста 23-го цикла, а по данным авторов работы [48], пик событий ICME наблюдается вблизи максимума 23-го солнечного цикла. Однако для событий Ejecta с Sheath (рис.13г), являющихся подтипом событий Ejecta, число событий в максимуме или в 2000г выше, чем в минимуме 23-го цикла (1996 г), но только в 2 раза (19 и 41 событий SH_{Ejecta} , соответственно, в 1996 и в 2000 г), а не на порядок (4 МС в 1996 и 53 МС в 2000г), как в работе [48]. Таким образом, по нашим данным число Ejecta с Sheath растёт от солнечного минимума к максимуму 23-го цикла, но не так сильно, как в работе [48]. Такое расхождение в поведении, возможно, связано, во-первых, с отличающейся методикой идентификации событий в работе [48] (понижение галактических лучей вызывается в основном вариациями ММП) и, во-вторых, с малой статистикой событий у нас особенно за 2000 г.

Для наглядности и из-за отсутствия других данных на рис. (13 б,г) приведено число событий CIR, Ejecta, Sheath из работы [57]. Авторы анализировали только отдельные небольшие интервалы внутри периода с 1997 по 2000 г, когда наблюдались геомагнитные возмущения, возрастания захваченных частиц в радиационных поясах, влияние радиации на станцию Мир, и увеличение активности индуцированных токов. Только треть

интервалов связана с прохождением магнитных облаков около Земли. Таким образом, статистика событий в работе [57], показанных на рис.13(б,в,г) сильно занижена, и не отражает реальный временной ход указанных событий.

На рис.13 (б) представлена частота годовых событий SIR и CIR за период 1979 – 1988 г [55]. События, представляющие собой области взаимодействия потоков солнечного ветра SIR, отбирались по следующим критериям: рост скорости плазмы, пик P_{tot} полного давления, перпендикулярного магнитному полю, с плавными понижениями по обеим сторонам, увеличение плотности протонов плазмы, сжатие магнитного поля, рост температуры протонов, и увеличение энтропии. События CIR являлись подклассом событий SIR, и отличались лишь рекуррентностью или повторяемостью событий с солнечным оборотом. Поскольку идентифицируемые нами события CIR включают в себя не только рекуррентные события, то очевидно, что более близкое совпадение должно наблюдаться с событиями SIR, что и видно на рис. 13(б). По результатам работы [55] средняя (за 10 лет с 1979 по 1988 г) доля рекуррентных событий CIR относительно полного числа событий SIR составляет 48.8%. По нашим данным (с учетом «дырок» в информации) доля рекуррентных событий CIR относительно полного числа событий CIR за весь период с 1976 по 2000 г составляет ~20%, что меньше, чем в работе [55].

Таким образом, по нашим данным основная доля событий CIR (~80%) относится к нерекуррентным событиям CIR. О наблюдении нерекуррентных высокоскоростных потоков плазмы, причем в разные фазы солнечной активности сообщалось в работе [58].

Какова доля магнитных облаков MC в общем числе событий Ejecta, и как она меняется с циклом солнечной активности?

Результаты нашей работы показывают, что годовое отношение числа событий MC к событиям EJECTA, усредненное за весь период времени с 1976 –2000 г, составляет ~8%, но оно меняется между 5 % и 22% в разные годы. Причем можно предположить, что годовая доля событий MC в несколько раз выше на фазах роста и спада солнечной

активности. Вклад событий МС в ICME оценивался для разных циклов солнечной активности авторами работ [15, 48, 53, 59-61].

Наиболее полно и подробно исследована доля МС относительно ICME(Ejecta) за 23-й цикл солнечной активности с 1995 по 2002 г [15, 48, 59]. За весь период времени доля событий МС в общей численности событий ICME составляет 25% и 15% по данным работ [48, 59], соответственно, что сопоставимо с нашим отношением МС/Ejecta~10% для интервала 1996 – 2000 г, но несколько выше, чем средняя доля МС/Ejecta~8%, полученная за 2.5 цикла солнечной активности (см. рис7б). В то же время за другой период 1978 – 1982 г доля МС составляла только 14% событий ICME, что близко к нашему значению 8%. По разным оценкам общая доля МС в событиях ICME(Ejecta) меняется в широких пределах от 14% до 80% [62-70].

Отметим, что по результатам авторов [15, 48, 59] годовая доля МС меняется с фазой активности, причем наблюдается уменьшение доли МС с удалением от солнечного минимума. Например, по данным авторов [48, 59] для 23-го цикла в минимуме активности (1996 г) она составляет 100% (все 4 события МС), а в максимуме активности (2000 г) уменьшается до 17% (9 МС из 53 событий ICME). Аналогичный тренд изменения доли МС с фазой солнечной активности (т.е. уменьшение доли МС с удалением от солнечного минимума) наблюдался в других солнечных циклах 20 – 21, в то время как данные наблюдений на КА Helios 1/2 на расстояниях 0.3 – 1.0 а.е. показывают более слабый тренд и большую долю МС относительно Ejecta [15]. В то же время по нашим данным годовая доля МС составляет 4.7% (2 МС и 42 Ejecta) в минимуме цикла (1996 г) и 8.1% (4 МС и 49 Ejecta) в максимуме цикла (2000 г); причем у нас максимальная доля МС 12.9% (12 МС и 93 Ejecta) наблюдается в 1997г, то есть в начале фазы роста цикла, а не на минимуме цикла (1996 г), как у других авторов (см. рис.7б). Таким образом, наши результаты о вариации доли МС с циклом солнечной активности, несколько расходятся с выводами работ [15, 48, 59]. Вариация доли МС относительно Ejecta за 21 – 23 циклы активности по

нашим данным показана на рис.7б. Однако, как видно на рис.7б, величина разброса отношения MC/Ejecta велика, поэтому мы можем говорить лишь о тенденциях изменений. Для однозначного ответа на вопрос о вариации доли MC с циклом активности требуются дополнительные исследования с большей статистикой событий MC. Мы предполагаем, что различные доли MC относительно событий Ejecta, полученные разными авторами, могут быть связаны с некоторыми различиями, как в критериях отбора событий, так и в самих наборах данных, которые использовали авторы, а также с пространственной локализацией спутников относительно структур солнечного ветра.

4.2 Длительности событий

В результате анализа разных типов течения солнечного ветра по данным базы OMNI, нами было показано, что средняя длительность разных типов событий, зарегистрированных в интервале времени 1976 – 2000 г., меняется в широком диапазоне между ~ 5 часами (HCS, Rare) и ~30 часами (Ejecta). Разброс в длительности каждого типа событий также очень большой (также см. [2]). Длительность области Sheath у обоих типов событий MC и Ejecta составляет в среднем примерно 1/2 от длительности самого события.

Как согласуются наши результаты о длительностях разных типов течения солнечного ветра с данными других работ, можно видеть в таблице 2, в которой приведены наши данные по длительностям разных типов течений (2-й столбец) и данные других авторов (3-й столбец).

Из таблицы 2 можно видеть, что самые большие длительности в 4.5 и 3 суток для событий CIR и ICME/Ejecta наблюдались на больших расстояниях от Солнца (5.3 а.е.) по данным КА Вояджера [71]. По мнению авторов работы [71] такая большая длительность часто связана со сложной структурой событий. Кроме того, длительность ICME (и других

типов течений солнечного ветра) зависит от траектории его распространения по отношению к спутнику.

Также следует отметить, что длительность событий ICME на 0.72 а.е., приведенная в работе [55], включает в себя также длительность области Sheath, которая часто предшествует Ejecta (по данным этих авторов она наблюдалась в 65 из 124 ICME). В среднем область Sheath занимает примерно 16% от длительности ICME/Ejecta по данным [55]. Но по нашим оценкам за более длительный период времени отношение длительности Sheath к длительности Ejecta составляет ~ 50% (см. рис.9).

Разные авторы оценивали длительности событий солнечного ветра в ограниченные периоды времени. В работе [55] представлены данные о длительностях событий CIR и ICME/Ejecta за 11 лет (период времени 1979 – 1988 г). Они показали, что длительность CIR короче вблизи минимума солнечной активности (1985 – 1988), что не противоречит нашим результатам (см. рис.8в, на котором показана вариация длительности CIR в пределах разброса измерений). А длительность ICME не зависит от солнечного цикла [55], что также не расходится с нашими результатами; хотя можно предположить, что максимальная длительность для Ejecta наблюдается вблизи максимума 21-го солнечного цикла (1980 г), но величина вариации в пределах разброса измерений (см. рис.8е). Еще раз подчеркнем, что по нашим данным разброс в длительностях событий каждого типа очень большой (см. бары на рис. 8 и рис.9), поэтому степень надежности таких заключений недостаточно высокая.

Длительности магнитных облаков MC меняются от нескольких часов до нескольких суток, что согласуется с результатами других работ [50, 52, 54, 73]. В то же время необходимо помнить, что на больших расстояниях 2.6 а.е. от Солнца из-за расширения магнитных облаков MC их длительность может возрастать до 48 – 50 час, что существенно больше, чем длительность MC на 1.а.е., равная ~24 час [45].

Длительность области Sheath (между ударной волной и ведущим краем ICME) по данным [72] меняется между 6 час и 12 час, что соответствует нашим оценкам области Sheath перед Ejecta и MC. Измеряемые длительности событий, а также соотношение между длительностями области Sheath и примыкающим к ней событиям Ejecta и MC, зависят от пространственной геометрии крупномасштабного явления солнечного ветра и от траектории пересечения спутником. Поэтому для более надежных выводов необходимо привлекать многоспутниковые наблюдения и модельные представления о структуре и геометрии явлений.

4.3. О геоэффективности событий

Полученные нами величины геоэффективностей MC и Sheath перед MC за весь 25-летний период времени 61,2% и 15% можно сопоставить с величинами, полученными другими авторами. Многие авторы исследовали MC в очень ограниченные периоды времени, например, в период 23-го цикла солнечной активности. Статистический анализ взаимосвязи между 271 магнитными бурями (корректированный индекс $Dst^* \leq -30$ нТ) и 104 магнитными облаками MC за период с 1 января 1998 г по 30 апреля 2002 г, был сделан авторами работы [54]. В результате ими показано, что около 80% магнитных облаков MC на фазе подъема и максимума 23-го солнечного цикла могут приводить к магнитным бурям, а геоэффективность области Sheath составляет 9.6% [54], что сопоставимо с нашими значениями.

На важность области Sheath, примыкающей к MC, а также отдельных частей самого MC (например, передней и задней границей магнитного облака), для возбуждения магнитных бурь указывалось в работах [20, 21, 28, 75,76]. По результатам работы [21] было получено, что 38% MC (из 34 событий MC), наблюдаемых вблизи минимума солнечной активности 23-го цикла (1995 – 1998), вызывают магнитные бури за счет

прохождения области Sheath (как области Sheath – 17.6%, так и MC с областью Sheath – 20.6%). Полученная авторами [21] геоэффективность области Sheath перед MC (17.6%), почти совпадает с нашей оценкой суммарной геоэффективности ~15%. В то же время геоэффективность MC, имеющих Sheath, составляет ~63% по нашим данным, что существенно выше, чем 20.6% в работе [21]. В другой работе [77] авторы, используя для анализа 68 MC наблюдаемых на WIND в период 1994 – 2002 г, нашли, что почти все MC (91% MC) вызывают хотя бы слабые магнитные бури. То есть, геоэффективность магнитных облаков MC по отношению к слабым, умеренным и сильным магнитным бурям достигает 91%, что превышает наши результаты (~61%).

Подробное исследование магнитных облаков (MC) и их геоэффективности во время 23-го солнечного цикла было сделано в работе [53]. По данным авторов геоэффективность области Sheath составляет 22% (в 16 случаях из 72-х событий причиной магнитной бури являлась область Sheath, предшествующая MC $16/72=0.22$). Указанное значение близко к величине 15%, полученной нами для суммарной геоэффективности области Sheath за период 1976 – 2000 г, и почти совпадает с величиной ~20% геоэффективности только для 23-го цикла (см. рис.9г, 1997 и 1998 г). По данным этой же работы [53] геоэффективность самих MC в ~2 раза выше, чем геоэффективность области Sheath, и оценивается в 48% (35 событий из всех 72 MC вызвали магнитную бурю, $35/72=0.48$), что также близко к нашему значению 61% для геоэффективности MC за 1976 – 2000 г. Следует подчеркнуть, что на величину геоэффективности сильно влияет тип магнитного облака MC, а именно, не только наличие/отсутствие области Sheath перед MC, но также, какое направление поля внутри MC - северное(N) или южное (S). Так для униполярных событий MC, внутри которых магнитное поле имеет только северное направление (униполярный N тип структуры MC), геоэффективность области Sheath достигает 67%. В то же время для биполярного типа структуры MC (направление поля меняется с южного на северное, SN тип, или с северного на южное направление, NS)

геоэффективность области Sheath составляет 17% и 22%, соответственно [53]. То есть, область Sheath вызывает магнитную бурю почти в 1/4 части событий (геоэффективность Sheath составляет 25%) [53].

По данным разных авторов геоэффективность магнитных облаков МС меняется в широких пределах от 35% вплоть до 70% [21, 48, 60, 78, 79]. Различия в геоэффективностях МС объясняются как различиями в методах анализа данных, так и направлением процесса анализа.

По данным авторов работ [70, 80, 81] от 1/4 до 1/2 всех магнитных бурь могут быть вызваны областью сжатия солнечного ветра Sheath, предшествующего событию ICME/Ejecta. По нашим оценкам за период 1976 – 2000 г около 31% магнитных бурь, для которых были идентифицированы драйверы в солнечном ветре, были вызваны событиями CIR, что также соответствует выводам авторов.

Исследования событий CIR за период 1964–2003 показали, что ~34% событий CIR, наблюдаемых вблизи Земли, являются геоэффективными и приводит к умеренным и интенсивным магнитным бурям [19]. Полученное значение геоэффективности CIR несколько выше нашего среднего значения 20%.

Согласно работе [30], в среднем, события ICME/Ejecta сильнее проявляются в Dst индексе, чем события CIR. Так за период 1996 – 2002 г 23-го цикла солнечной активности большинство событий CIR, вызывающих магнитные бури, происходят вблизи минимума (1996 г) или фазы спада солнечной активности. Напротив, число событий ICME и мощность бурь, вызываемых ими (минимум Dst), растет к максимуму солнечной активности. Однако по нашим данным за аналогичный период времени 1996 - 2000 (рис.12в,е) максимальное число геоэффективных событий CIR наблюдается вблизи максимума (1999г), а геоэффективных событий Ejecta на самом максимуме 23-го цикла (2000г), что не совпадает с результатами авторов работы [30].

Литературные источники свидетельствуют, что частота появления солнечных событий СМЕ имеет пик вблизи солнечного максимума [82, 83], поэтому во время солнечного максимума преобладают ICME-бури [11, 30, 79; 80, 84]. Частота появления событий CIR (с 27-дневной повторяемостью) имеет пик во время поздней фазы спада солнечного цикла [85], поэтому бури на фазе спада преимущественно вызываются событиями CIR [30, 58, 74, 80]. По нашим данным, геоэффективные события CIR действительно появляются чаще на фазе спада (21 и 22 циклы), но могут также иметь 2-й пик вблизи максимума (например, в 22-м и 23-м циклах, рис.12в). В то время как геоэффективные события Ejecta имеют раздвоенные пики вблизи максимумов активности (по одному пику с каждой стороны от максимума) (рис.12е).

Ранее в работе [79] было получено, что доли магнитных бурь от событий MC/Ejecta и CIR имеют по 2 максимума (CIR в максимуме и минимуме цикла) за солнечный цикл и изменяются в противофазе. Этот эффект может быть связан с двумя причинами: (1) изменение геоэффективностей MC/Ejecta и CIR в солнечном цикле (рис.12) и (2) изменение относительного числа событий MC/Ejecta и CIR в солнечном цикле (рис.7). Согласно рис.12(в,е) только в 22-м цикле можно видеть 2 пика для геоэффективных событий CIR (вблизи максимума и вблизи минимума солнечной активности), в то время как в 21-м цикле виден только 1 пик CIR на фазе спада, а в 23-м не полном цикле – 1 пик на фазе подъема. Минимальное число CIR, вызывающих магнитные бури умеренной и сильной интенсивности, наблюдается вблизи минимумов солнечной активности. Аналогично события Ejecta, особенно с Sheath, которые приводят к магнитным бурям, также имеют по 2 пика. Но в отличие от событий CIR, пики геоэффективных Ejecta с Sheath расположены ближе к максимумам цикла – на фазах подъема и спада. Можно предположить, что наблюдается раздвоение пика геоэффективных Ejecta на максимуме, и ход геоэффективных Ejecta находится в противофазе с изменением геоэффективных CIR, повторяя ход числа магнитных бурь (ср.

рис.12в и 12е). Если посмотреть на рис.7е, показывающий вариацию отношения числа событий Ejecta к CIR (Ejecta/CIR, то есть, всех событий Ejecta и CIR, независимо от связи с магнитными бурями), то можно видеть, что частота появления событий Ejecta меняется в противофазе с частотой появления событий CIR. Таким образом, обнаруженный эффект [79] не противоречит данным настоящей статьи и может быть связан с относительным числом событий MC(Ejecta) и CIR в солнечном ветре. Однако точный ответ на вопрос о причинах присутствия 2-х максимумов за каждый солнечный цикл в долях магнитных бурь от событий Ejecta и CIR, которые меняются в противофазе, требует дополнительных исследований.

Таким образом, можно предположить, что события ICME и MC являются главным источником умеренных и интенсивных магнитных бурь, особенно около максимума солнечной активности. Напротив, на фазе спада солнечного цикла главным источником геомагнитной активности являются события CIR, то есть области сжатия, образованные коротящими высокоскоростными течениями, выходящие из корональных дыр [60]. Средняя скорость появления интенсивных магнитных бурь вблизи солнечного максимума в 2 – 3 раза больше, чем наблюдается на восходящих фазах солнечного цикла вблизи минимума [60]. Однако по нашим данным частота появления умеренных и сильных магнитных бурь имеет 2 пика вблизи максимума (на восходящем и нисходящем цикле солнечной активности). И ход частоты геоэффективных событий Ejecta повторяет ход частоты магнитных бурь умеренной и сильной интенсивности (см. рис.12б,е).

Таким образом, полученная нами информация о геоэффективности разных типов крупномасштабных течений солнечного ветра не только, в основном, подтверждает полученные ранее результаты других авторов, но и значительно расширяет эту информацию, охватывая большой период времени с 1976 по 2000 г.

5. Основные выводы

В данной работе мы определили относительную частоту появления различных типов солнечного ветра и их геоэффективность для умеренных и сильных магнитных бурь с $Dst < -50$ нТ, как в целом за весь период времени, так и их вариации в цикле солнечной активности на протяжении почти 3-х солнечных циклов. В основу данной работы положен каталог крупномасштабных типов солнечного ветра для 1976-2000 годов (см.

<ftp://ftp.iki.rssi.ru/omni/>), созданный нами на основе базы OMNI

(<http://omniweb.gsfc.nasa.gov>) [1] и подробно описанный в работе [2]. Нами были выделены и проанализированы 8 типов крупномасштабных течений плазмы солнечного ветра, включая подтипы (HCS, CIR, Sheath, Ejecta, MC, Rare). Все явления типа Sheath были разделены на 2 подтипа: Sheath, предшествующие Ejecta (Sh_E), и Sheath, предшествующие MC (Sh_{MC}). Было получено полное число всех типов и подтипов солнечного ветра.

Анализ вариации годовых чисел событий в зависимости от цикла солнечной активности позволил сделать следующие выводы:

- Среднегодовое число различных типов событий составляет: 124 ± 81 для HCS, 8 ± 6 для MC, 99 ± 38 для Ejecta, 46 ± 19 для Sheath перед Ejecta, 6 ± 5 для Sheath перед MC, и 63 ± 15 для CIR.
- Частота появления событий CIR не зависит от цикла солнечной активности или эта зависимость слабая.
- Только 3 типа событий HCS, Ejecta и MC, включая подтипы Sh_E и Sh_{MC} , зависят от фазы цикла солнечной активности. Причем наибольшее число событий HCS наблюдается вблизи минимума солнечной активности. События Ejecta и MC (полное число событий, независимо от присутствия/отсутствия области Sheath), а также Sh_{MC} и Sh_E чаще наблюдаются на фазе роста и вблизи максимума солнечной активности. Частота появления области Sheath и перед MC, и перед Ejecta,

возможно, имеет 2 пика: на восходящей и нисходящей части цикла солнечной активности.

- Магнитные облака MC встречаются в солнечном ветре на порядок реже, чем события Ejecta: средняя годовая доля MC относительно событий EJECTA составляет примерно $8\pm 5\%$. Доля MC (относительно событий Ejecta) увеличивается вблизи фаз роста и спада солнечной активности (10 – 22% от событий Ejecta), но уменьшается в ~4 раза (до 2 – 9%) вблизи минимума и максимума солнечной активности.
- Средняя годовая доля событий Sheath, примыкающих к MC, составляет $72\pm 35\%$ от всех событий MC.
- Среднегодовое число MC событий составляет только $14\pm 13\%$ от событий CIR.
- В целом доля Sheath у событий Ejecta составляет около половины от всех событий Ejecta ($47\pm 12\%$).
- Годовая доля событий Sheath, предшествующих событиям MC, составляет $14\pm 10\%$ относительно событий Sheath, примыкающих к Ejecta.
- Годовое число событий Ejecta в 1.63 ± 0.65 раза превышает годовое число событий CIR. Отношение событий Ejecta/CIR максимально и превышает среднее отношение ($Ejecta/CIR > 1.63$) на фазе роста солнечной активности, и минимально и ниже среднего отношения ($Ejecta/CIR < 1.63$) на фазе спада цикла активности, включая минимум.

Анализ распределения среднегодовых длительностей для разных типов событий солнечного ветра показал:

- Средняя длительность разных типов событий меняется между ~ 5-ю часами (HCS, Rare) и ~30 часами (Ejecta) и составляет: 5 ± 2 ч для событий HCS, 24 ± 11 ч для MC, 29 ± 5 ч для Ejecta, 16 ± 3 ч для Sheath перед Ejecta, 9 ± 5 ч для Sheath перед MC, 20 ± 4 ч для CIR.

- В среднем за весь период длительность MC меньше длительности Ejecta и составляет $\sim 85 \pm 50\%$ от длительности Ejecta.
- У событий Ejecta длительность Sheath составляет примерно $57 \pm 15\%$ от длительности Ejecta. У событий MC длительность Sheath составляет примерно $46 \pm 53\%$ длительности MC.
- Длительность области Sheath перед MC составляет $60 \pm 40\%$ от длительности Sheath у Ejecta.
- Не обнаружено зависимости длительности области Sheath от длительности, примыкающего к нему MC или Ejecta, как для быстрых MC и Ejecta (при скорости плазмы солнечного ветра внутри MC и Ejecta, $V_{sw} > 450$ км/с), так и для медленных MC и Ejecta (при скорости плазмы солнечного ветра внутри MC и Ejecta, $V_{sw} < 450$ км/с).

Для оценки геоэффективности событий солнечного ветра в архив был добавлен список магнитных бурь с $Dst < -50$ нТ. Всего за весь период времени 1976 – 2000 г было выделено 798 магнитных бурь с интенсивностью $Dst < -50$ нТ. Всем магнитным бурям, для которых имелись измерения параметров плазмы и магнитного поля в межпланетной среде, были поставлены в соответствие определенные типы течений солнечного ветра. Величина геоэффективности каждого типа событий оценивалась, как отношение числа событий, приведших к магнитным бурям, к полному числу событий. Из анализа числа магнитных бурь и разных типов событий солнечного ветра следует:

- Число магнитных бурь умеренной и сильной интенсивности меняется с циклом солнечной активности. Частота появления магнитных бурь в ~ 6 раз выше вблизи максимума солнечной активности, чем вблизи минимума активности.
- Только 58% (464 бури из 798-ми) магнитных бурь умеренной и сильной интенсивности были вызваны одним из выделенных нами типов солнечного ветра: 31.2% - CIR, 20.7% бурь вызваны событиями Sheath (примыкающими к Ejecta и

MC), 13.4% магнитных бурь связаны с магнитными облаками MC, 34.7% магнитных бурь вызваны событиями Ejecta. Для оставшихся 42% магнитных бурь источник не определен, в основном, из-за отсутствия данных солнечного ветра. Таким образом, 1/3 магнитных бурь, для которых найдены их источники в солнечном ветре, вызваны CIR, 1/2 магнитных бурь вызваны событиями ICME (Ejecta и MC), и 1/5 (~20%) магнитных бурь вызвана областью Sheath (примыкающей к Ejecta и MC).

- Наибольшая величина суммарной геоэффективности 0.613 у событий MC (0.643 и 0.545 для событий с Sheath и без него, соответственно), наименьшая 0.142 у Ejecta (0.212 и 0.078 для событий с Sheath и без него, соответственно). Геоэффективность событий CIR равна 0.202. Суммарные геоэффективности событий MC с Sheath и событий MC без Sheath близки между собой и равны 0.633 и 0.545, соответственно. Суммарная геоэффективность Ejecta без Sheath (равна 0.08) в 2.5 раза ниже геоэффективности Ejecta с Sheath (0.212). Суммарная геоэффективность событий Ejecta с Sheath (0.212) в 3 раза ниже, чем у событий MC с Sheath (0.633).
- Вариация геоэффективности событий CIR: от 5-10% вблизи минимума до 30-40% на фазе спада и подъема цикла.
- Минимальная геоэффективность каждого типа событий наблюдается вблизи минимума солнечной активности. Пик геоэффективности смещается относительно максимума солнечной активности в зависимости от типа события. Для Ejecta с Sheath возможны 2 пика геоэффективности: на фазах подъема и спада солнечной активности.

В условиях отсутствия стандартизованных методик анализа данных о типах солнечного ветра, полученные в данной работе результаты, в основном, согласуются с ранее полученными результатами в пределах разброса измерений и их неопределенностей.

Авторы благодарны за возможность использования базы данных OMNI. Данные OMNI получены из GSFC/SPDF OMNIWeb interface на <http://omniweb.gsfc.nasa.gov>. Работа поддержана грантами РФФИ N 04-02-16131, 07-02-00042, а также Программой ОФН №16 «Плазменные процессы в солнечной системе».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. King J.H. and N.E. Papitashvili. Solar wind spatial scales in and comparisons of hourly Wind and ACE plasma and magnetic field data // J. Geophys. Res. 2004. V. 110. N. A2. A02209, 10.1029/2004JA010804.
2. Ермолаев Ю.И., и др. Каталог крупномасштабных явлений солнечного ветра для периода 1976 – 2000 г // Космич. Исслед. 2009. 47. N1. С.1-12
3. “Плазменная гелиогеофизика”. Т.1, Т.2. Под ред. Л.М.Зеленого и И.С.Веселовского. Издательство «Физматлит». 2008 (в печати).
4. *Proceedings of the Solar Wind 11 / SOHO 16, "Connecting Sun and Heliosphere" Conference* (ESA SP-592). Held 12 - 17 June 2005, in Whistler, Canada. Edited by B. Fleck, T. H. Zurbuchen and H. Lacoste. Also published on CDROM. ISBN 92-9092-903-0; ISSN 0379-6566 & 1609-042X (CD). Published by ESA Publications Division, ESTEC, Postbus 299, 2200 AG Noordwijk, The Netherlands, 2005.
5. Schwenn R. Solar wind sources and their variations over the solar cycle// Space Sci. Rev.2006. V.124. P. 51. DOI: 10.1007/s11214-006-9099-5
6. Yermolaev Y. I., and M. Y. Yermolaev (2008), [Comment on "Interplanetary origin of intense geomagnetic storms \(Dst < -100 nT\) during solar cycle 23" by W. D. Gonzalez et al.](#)// Geophys. Res. Lett. 2008. doi:10.1029/2007GL030281
7. Dungey J. W. Interplanetary magnetic field and the auroral zones// Phys. Rev. Lett. 1961. V. 6. P. 47.
8. Akasofu S. I. Energy coupling between the solar-wind and the magnetosphere // Space Sci. Rev. 1981. V. 28. P. 121.
9. Russell C.T., R.L. McPherron, and R.K. Burton. On the cause of geomagnetic storms // J. Geophys. Res. 1974. V. 79. N. 7. P. 1105.

10. *Perreault P., and S.-I. Akasofu.* A study of geomagnetic storms // *Geophys. J. R. Astron. Soc.* 1978. V. 54. P. 547.
11. *Gonzalez W.D., Joselyn, et al.* What is a geomagnetic storm? // *J. Geophys. Res.* 1994. V. 99. P. 5771.
12. *Gonzalez W. D. , B.T. Tsurutani and A.L. C. de Gonzalez.* Interplanetary origin of geomagnetic storms // *Space Science Reviews.* 1999. V. 88. N. 3-4. P. 529. DOI 10.1023/A:1005160129098].
13. *Bothmer V. and R. Schwenn.* Eruptive prominences as sources of magnetic clouds in the solar wind // *Space Sci. Rev.* 1994. V. 70. P. 215.
14. *Lepping R. P., D. B. Berdichevsky, et al.* A summary of WIND magnetic clouds for years 1995–2003: model-fitted parameters, associated errors and classifications // *Annales Geophysicae.* 2006. V. 24. P. 215.
15. *Richardson I. G., and H. V. Cane.* The fraction of interplanetary coronal mass ejections that are magnetic clouds: Evidence for a solar cycle variation // *Geophys. Res. Lett.* 2004. V. 31. L18804, doi:10.1029/2004GL020958
16. *Pizzo V. J.* Recurrent Magnetic Storms: Corotating Solar Wind Streams // *Geophysical Monograph Series.* Eds. Tsurutani, B., McPherron, R., Gonzalez, W., Lu, G., Sobral, Jose' H.A., Gopalswamy N. 2006. V. 167.
17. *Yermolaev Y. I., M. Y. Yermolaev, et al.* Statistical studies of geomagnetic storm dependencies on solar and interplanetary events: A review // *Planet. Space Sci.* 2005. V. 53. P. 189.
18. *Yermolaev Yu.I. and M.Yu. Yermolaev.* [Statistic study on the geomagnetic storm effectiveness of solar and interplanetary events](#) // *Adv. Space Res.* 2006. V. 37. N. 6. P.1175.
19. *Alves, M. V., E. Echer, and W. D. Gonzalez.* Geoeffectiveness of corotating interaction regions as measured by Dst index // *J. Geophys. Res.* 2006. V.111. A07S05, doi:10.1029/2005JA011379.

20. *Huttunen K. E. J., H. E. J. Koskinen and R. Schwenn.* Variability of magnetospheric storms driven by different solar wind perturbations // *J. Geophys. Res.* 2002. V. 107. N. A7. P.1121. doi:10.1029/2001JA900171;
21. *Wu C.-C. and R. P. Lepping.* Effects of magnetic clouds on the occurrence of geomagnetic storms: The first 4 years of Wind // *J. Geophys. Res.* 2002. V.107. N. A10. P.1314. doi:10.1029/2001JA000161;
22. *Yermolaev Yu. I., M. Yu. Yermolaev and I. G. Lodkina.* Comment on "A statistical comparison of solar wind sources of moderate and intense geomagnetic storms at solar minimum and maximum" by Zhang, J.-C., M. W. Liemohn, J. U. Kozyra, M. F. Thomsen, H. A. Elliott, and J. M. Weygand (*J. Geophys. Res.* 2006.) // <http://arxiv.org/abs/physics/0603251>
23. *Zhang J.I., G. Richardson et al.* Solar and interplanetary sources of major geomagnetic storms ($Dst < -100$ nT) during 1996–2005 // *J. Geophys. Res.* 2007. V. 112. A10102. doi:10.1029/2007JA012321.
24. *Echer E., W. D. Gonzalez, et al.* Interplanetary conditions causing intense geomagnetic storms ($Dst < -100$ nT) during solar cycle 23 (1996–2006) // *J. Geophys. Res.* 2008. V. 113. A05221. doi:10.1029/2007JA012744.
25. *Ермолаев Ю.И., М.Ю.Ермолаев, и др.* Статистическое исследование гелиосферных условий, приводящих к магнитным бурям // *Космич. Исслед.* 2007. Т.45. N. 1. С. 3.
26. *Ермолаев Ю.И., М.Ю.Ермолаев, и др.* Статистическое исследование гелиосферных условий, приводящих к магнитным бурям, 2 часть // *Космич. Исслед.* 2007. Т. 45. N. 6. С. 489.
27. *Huttunen K. E. J. and Koskinen H. E. J.* Importance of post-shock streams and sheath region as drivers of intense magnetospheric storms and high-latitude activity // *Annales Geophys.* 2004. V. 22. P.1729.
28. *Vieira L. E. A., Gonzalez W.D., et al.* Storm-intensity criteria for several classes of the driving interplanetary structures // *Solar Physics* 2004. V. 223. P. 245.

29. *Miyoshi Y., and R. Kataoka.* Ring current ions and radiation belt electrons during geomagnetic storms driven by coronal mass ejections and corotating interaction regions // *Geophys. Res. Lett.* 2005. V. 32. L21105. doi:10.1029/2005GL024590.
30. *Borovsky J. E. and M. H. Denton.* Differences between CME-driven storms and CIR-driven storms // *J. Geophys. Res.* 2006. V. 111. A07S08. doi:10.1029/2005JA011447.
31. *Denton, M. H., J. E. Borovsky, et al.* Geomagnetic storms driven by ICME- and CIR-dominated solar wind // *J. Geophys. Res.* 2006. V. 111. A07S07. doi:10.1029/2005JA011436.
32. *Guarnieri F. L., B. T. Tsurutani, et al.* ICME and CIR storms with particular emphasis on HILDCAA events // *ILWS Workshop.* 2006. Goa. February 19-24.
33. *Plotnikov I.Ya. and E.S. Barkova.* Advances in space research nonlinear dependence of Dst and AE indices on the electric field of magnetic clouds // *Advances in Space Research* 2007. V. 40. P. 1858.
34. *Yermolaev Yu.I., M.Yu. Yermolaev, et al.* [Interplanetary conditions for CIR-induced and MC-induced geomagnetic storms](#) // *Bulg. J. Phys.* 2007. V. 34. P. 128.
35. *Badruddin.* Transient Perturbations and their Effects in the Heliosphere, the Geomagnetosphere, and the Earth's Atmosphere: Space Weather Perspective // *J. Astrophys. Astr.* 2006. V. 27. P. 209.
36. *Pulkkinen T. I., N. Partamies, 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.
37. *Ермолаев Ю.И. и М.Ю.Ермолаев.* О некоторых статистических взаимосвязях солнечных, межпланетных и геомагнитосферных возмущений в период 1976 – 2000 гг. 3. // *Космич. Исслед.* 2003. Т. 41. N. 6. С. 574.
38. *Farrugia, C. J., H. Matsui, et al.* Survey of intense Sun-Earth connection events (1995–2003) // *Adv. Space Res.* 2006. V. 38. N. 3. P. 498.

39. *Khabarova O.V.* Current problems of magnetic storm prediction and possible ways of their solving // *Sun and Geosphere*. 2007. V. 2. N.1. P.32.
40. *Gonzalez W. D. and E. Echer.* A study on the peak Dst and peak negative Bz relationship during intense geomagnetic storms // *Geophys. Res. Lett.* 2005. V. 32. L18103.
doi:10.1029/2005GL023486.
41. *Ермолаев Ю.И., и М.Ю. Ермолаев.* Зависит ли сила геомагнитной бури от класса солнечной вспышки? // *Космич. Исслед.* 2009. Т.47. №2.
42. *Gnevyshev M. N.* On the 11-years cycle of solar activity // *Sol. Phys.* 1967. V.1. P.107.
43. *Gnevyshev M. N.* Essential features of the 11 year solar cycle // *Sol. Phys.* 1977. V. 51. P.175.
44. *Kane R.P.* Gnevyshev Peaks and Gaps for Coronal Mass Ejections of Different Widths Originating in Different Solar Position Angles // *Solar Phys.* 2008. V. 249. P. 369.
DOI 10.1007/s11207-008-9185-9.
45. *Bothmer V. and R. Schwenn.* The structure and origin of magnetic clouds in the solar wind // *Ann. Geophys.* 1998. V.16. P. 1.
46. *Burlaga L.F.* Magnetic Clouds // in: *Physics of the Inner Heliosphere 2 – Particles, Waves and Turbulence*, edited by Schwenn, R. and E.Marsch, 1991. V. 21. P.1. Springer-Verlag. New York.
47. *Bothmer V. and Rust M. D.* The field configuration of magnetic clouds and the solar cycle // in *Coronal Mass Ejections*. edited by Crooker, N., Joselyn, J. A, and Feynman, J.. AGU. Washington D.C. *Geophys. Monogr.* 1997.V.99. P.137.
48. *Cane H. V., and I. G. Richardson.* Interplanetary coronal mass ejections in the near-Earth solar wind during 1996–2002 // *J. Geophys. Res.* 2003. V. 108. N. A4. P.1156.
doi:10.1029/2002JA009817.
49. *Mahrous A, et al.* Empirical model of the transit time of interplanetary coronal mass ejections // *COSPAR*. 2006.

50. Wu C.-C., R. P. Lepping and N. Gopalswamy. Relationships among magnetic clouds, CMEs and geomagnetic storms // Sol. Phys. 2006. V. 239. P. 449. DOI: 10.1007/s11207-006-0037-1.
51. Lepping R. P., and C.-C. Wu. On the variation of interplanetary magnetic cloud type through solar cycle 23: Wind events // J. Geophys. Res. 2007. V. 112. A10103.
doi:10.1029/2006JA012140.
52. Lynch B. J., Zurbuchen et al. Internal structure of magnetic clouds: Plasma and composition // J. Geophys. Res. 2003. V.108. N.A6. doi:10.1029/2002JA009591.
53. Huttunen K. E. J., R. Schwenn, et al. Properties and geoeffectiveness of magnetic clouds in the rising, maximum and early declining phases of solar cycle 23 // Annales Geophys. 2005. V. 23. P. 625. SRef-ID: 1432-0576/ag/2005-23-625.
54. Zhang J.-C., M. W. Liemohn, et al. A statistical study of the geoeffectiveness of magnetic clouds during high solar activity years // J. Geophys. Res. 2004. V. 109. A09101.
doi:10.1029/2004JA010410.
55. Jian L.K., C.T. Russell et al. Stream Interactions and Interplanetary Coronal Mass Ejections at 0.72 AU // Solar Phys. 2008. V.249. P. 85. DOI 10.1007/s11207-008-9161-4.
56. Lindsay G.M., J.G. Luhmann, et al. Relationships between coronal mass ejection speeds from coronagraph images and interplanetary characteristics of the associated interplanetary coronal mass ejections // J. Geophys. Res. 1999. V. 104. P. 12515.
57. Dmitriev A. V., N. B. Crosby, and J.-K. Chao. Interplanetary sources of space weather disturbances in 1997 to 2000 // Space Weather. 2005. V. 3. S03001.
doi:10.1029/2004SW000104.
58. Bobrov M. S. Non-recurrent geomagnetic disturbances from highspeed streams // Planet. Space Sci. 1983. V. 31. P. 865.
59. Richardson J.D. and H. V. Cane. A survey of interplanetary coronal mass ejections in the near-earth solar wind during 1996 – 2005 // Proc. Solar Wind 11 – SOHO 16 “Connecting Sun and Heliosphere”. 2005. Whistler. Canada. 12 – 17 June 2005. (ESA SP-592, September 2005).

60. *Meloni A., P. De Michelis and R. Tozzi.* Geomagnetic storms, dependence on solar and interplanetary phenomena: a review // *Mem. S.A.It.* 2005. V. 76. P. 882.
61. *Liu Y., Richardson J.D., Belcher J.W.* A statistical study of the properties of interplanetary coronal mass ejections from 0.3 to 5.4 AU // *Planet. Space Sci.* 2005. V. 53. P. 3.
62. *Richardson I. G., C. J. Farrugia, and H. V. Cane.* A statistical study of the electron temperature in ejecta // *J. Geophys. Res.* 1997. V.102. P. 4691.
63. *Marubashi K.* Physics of interplanetary magnetic flux ropes: Towards prediction of magnetic storms // *Adv. Space Res.* 2000. V. 26. P. 55.
64. *Gosling J. T.* Coronal mass ejections and magnetic flux ropes in interplanetary space // in *Physics of Magnetic Flux Ropes, Geophys.Monogr. Ser.* edited by C. T. Russell, E. R. Priest, and L. C.Lee. AGU. Washington. D. C. 1990. V. 58. P. 343.
65. *Mulligan T., C. T. Russell and J. T. Gosling.* On interplanetary coronal mass ejection identification at 1 AU // in *Solar Wind Nine. AIP Conf. Proc.* 1999. V. 471. P. 693.
66. *Cane H. V., I. G. Richardson, and T. T. von Roseninge.* Cosmic ray decreases: 1964–1994 // *J. Geophys. Res.* 1996. V. 101. P. 21561.
67. *Bothmer V., and R. Schwenn.* Signatures of fast CMEs in interplanetary space // *Adv. Space Res.* 1996. V. 17. P. 319.
68. *Cane H. V., I. G. Richardson, and G. Wibberenz.* Helios 1 and 2 observations of particle decreases, ejecta, and magnetic clouds // *J. Geophys. Res.* 1997. V.102. P. 7075.
69. *Henke T., et al.* Ionization state and magnetic topology of coronal mass ejections // *J. Geophys. Res.* 2001. V. 106. P. 10957.
70. *Owens M. J., P. J. Cargill, et al.* Characteristic magnetic field and speed properties of interplanetary coronal mass ejections and their sheath regions // *J. Geophys. Res.* 2005. V. 110. A01105. doi:10.1029/2004JA010814.
71. *Jian L.K., C.T. Russell et al.* Stream Interactions and Interplanetary Coronal Mass Ejections at 5.3 AU near the Solar Ecliptic Plane // *Solar Phys.* DOI 10.1007/s11207-008-9204-x

72. *Russell C. T. and T. Mulligan.* The true dimensions of interplanetary coronal mass ejections // *Adv. Space Res.* 2002. V. 29. P. 301.
73. *Lepping R. P., C.-C. Wu, et al.* Forecasting the intensity of magnetic storms caused by NYS type interplanetary magnetic clouds // *Eos Trans. AGU.* 2005. V. 86(52). Fall Meet. Suppl. Abstract SH23A-0334.
74. *Richardson I. G., V. M. Dvornikov, et al.* Bidirectional particle flows at cosmic ray and lower (~1 MeV) energies and their association with interplanetary coronal mass ejections/ejecta // *J. Geophys. Res.* 2000. V.105. P. 12597.
75. *Tsurutani B. T. and W. D. Gonzalez.* The interplanetary causes of magnetic storms: A review, *Magnetic Storms* // *Geophys. Monogr. Ser.* edited by B. T. Tsurutani et al. AGU. Washington D.C. 1997. V. 98, P. 77.
76. *Gonzalez W. D., A. L. C. Gonzalez, et al.* Solar and interplanetary causes of very intense geomagnetic storms // *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.* 2001. V. 63. P. 403.
77. *Wu C.-C., Lepping R. P. and Gopalswamy N.* Variations of magnetic clouds and CMEs with solar activity cycle // in *Proc. ISCS 2003 Symposium "Solar variability as an input to the Earth's Environment"*. Slovakia. ESA. 2003. V.1. P. 429.
78. *Vennerstroen S.* Interplanetary sources of magnetic storms: a statistical study // *J. Geophys. Res.* 2001. V. 106. P. 29175.
79. *Ермолаев Ю.И. и М.Ю. Ермолаев.* О некоторых статистических взаимосвязях солнечных, межпланетных и геомагнитосферных возмущений в период 1976 – 2000 гг // *Космич. Исслед.* 2002. Т. 40. N. 1. С. 1.
80. Richardson, I. G., E. W. Cliver, and H. V. Cane (2001), Sources of geomagnetic storms for solar minimum and maximum conditions during 1972–2000, *Geophys. Res. Lett.*, 28, 2569.
81. *Tsurutani B. T., Gonzalez, W. D., et al.* Origin of Interplanetary Southward Magnetic Fields Responsible for Major Magnetic Storms Near Solar Maximum (1978–1979) // *J. Geophys. Res.* 1988. V. 93. P. 8519.

82. *Webb D. F.* The solar cycle variation of the rates of CMEs and related activity // *Adv. Space Res.* 1991. V. 11. P. 37.
83. *Yashiro S., Gopalswamy, N., et al.* A catalog of white light coronal mass ejections observed by the SOHO spacecraft // *J. Geophys. Res.* 2004. V.109. A07105. doi:10.1029/2003JA010282.
84. *Richardson I. G., H. V. Cane and E. W. Cliver.* Sources of geomagnetic activity during nearly three solar cycles (1972– 2000) // *J. Geophys. Res.* 2002. V. 107. N.A8. P. 1187. doi:10.1029/2001JA000504.
85. *Mursula K. and B. Zeiger.* The 13.5-day periodicity in the sun, solar wind, and geomagnetic activity: The last three solar cycles // *J. Geophys. Res.* 1996. V. 101. P. 27077.

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

Рис.1. Время появления солнечных рентгеновских вспышек класса М и Х (левая панель, серые и черные интервалы, соответственно) и геомагнитных возмущений умеренной и сильной интенсивности (правая панель, серые и черные интервалы: для $-100 < Dst < -50$ нТ и $Dst < -100$ нТ, соответственно), за 1976 – 2000 г (вертикальная ось) в зависимости от суток 27-дневного Каррингтоновского оборота Солнца (горизонтальная ось).

Рис.2. Изменение по годам среднегодовых чисел (а) солнечных пятен, (б) HCS, (в) CIR, (г) Sheath перед Ejecta (Sh_E), (д) Sheath перед MC (Sh_{MC}), (е) Ejecta, (ж) MC, (з) Rare, (и) Fast, (к) Slow. События Ejecta и MC включают все подтипы.

Рис.3. Отношение длительности наблюдения каждого типа солнечного ветра к полной длительности наблюдений (с измерениями плазмы и магнитного поля) в году. Справа на каждой панели приведены годовые значения, усредненные за весь период, со среднеквадратичными отклонениями.

Рис. 4. Время появления событий MC (левая панель, черные интервалы), и событий CIR (правая панель, черные интервалы) за 1976 – 2000 г представлены как на рис.1. Серым цветом обозначены периоды с наличием данных плазмы и магнитного поля, белым цветом показаны интервалы с отсутствием данных.

Рис. 5. Время появления событий MC (левая панель: все MC - темно-серые интервалы, Sheath перед MC – черные интервалы), и событий Ejecta (правая панель: все Ejecta - темно-серые интервалы, Sheath перед Ejecta – черные интервалы) за 1976 – 2000 г представлены как на рис.1. Светло-серым цветом обозначены периоды с наличием

данных плазмы и магнитного поля, белым цветом показаны интервалы с отсутствием данных.

Рис.6. То же, что на Рис.2, но с нормировкой (т.е. с учетом пропусков данных).

Рис. 7. Изменение по годам (а) чисел пятен и отношений среднегодовых чисел: (б) $MC/Ejecta$, (в) $Sh_E/Ejecta$, (г) Sh_{MC}/MC , (д) Sh_E/Sh_{MC} , (е) $Ejecta/CIR$, (ж) MC/CIR . Справа на каждой панели приведены годовые отношения, усредненные за 1976 – 2000 г со среднеквадратичными отклонениями.

Рис.8. Изменение по годам среднегодовых (а) чисел солнечных пятен, и длительностей разных типов потоков солнечного ветра: (б) HCS, (в) CIR, (г) Sheath перед Ejecta (Sh_E), (д) Sheath перед MC (Sh_{MC}), (е) Ejecta, (ж) MC, (з) Rare. События Ejecta и MC включают все подтипы.

Рис.9. Изменение по годам: (а) годовых чисел солнечных пятен, и отношений длительностей: (б) для событий MC и Ejecta, dT_{MC}/dT_{Ejecta} ; (в) для событий Sheath перед Ejecta и Ejecta, dT_{ShE}/dT_{Ejecta} ; (г) для событий Sheath перед MC и MC, dT_{ShMC}/dT_{MC} ; (д) для событий Sheath перед MC и перед Ejecta, dT_{ShMC}/dT_{ShE} . События Ejecta и MC включают все подтипы. Пунктирные линии на панелях (б-д) показывают отношение длительностей, усредненное за 1976-2000 г.

Рис.10. Изменение по годам: (а) годовых чисел солнечных пятен, и отношения среднегодовых длительностей, примыкающих по времени: (б) Sheath и MC, dT_{ShMC}/dT_{MC} ; (б) Sheath и Ejecta, dT_{ShE}/dT_{Ejecta} . Среднегодовые отношения длительностей оценивались по

отношениям среднегодовых длительностей. Пунктирные линии на панелях (б,в) показывают отношение длительностей, усредненное за 1976 – 2000 г.

Рис.11. Зависимости (а) длительности dT_{ShE} от длительности dT_{Ejecta} , движущегося со скоростью $V < 450$ км/с (светлые точки) и $V > 450$ км/с (черные точки), (б) длительности dT_{ShMC} от длительности dT_{MC} , движущегося со скоростью $V < 450$ км/с (светлые точки) и $V > 450$ км/с (черные точки). Черная и серая линии показывают линейную аппроксимацию для 2-х типов событий с разными скоростями.

Рис.12. Изменение по годам: (а) солнечных пятен, (б) магнитных бурь, и геоэффективностей (в) CIR, (г) Sh_E , (серый цвет) и Sh_{MC} (черный цвет) (д) MC с Sheath (черный цвет) и MC без Sheath (серый цвет), (е) Ejecta с Sheath (черный) и Ejecta без Sheath (серый). Справа приведены величины суммарных за 1976 – 2000 г геоэффективностей каждого типа событий.

Рис. 13. Вариации годовых чисел: (а) пятен, (б) CIR, (в) Ejecta, (г) Sh_E , (д) MC, (е) Sh_{MC} по данным базы OMNI (гистограммы) и по данным других авторов (точки и линии).

Таблица 1. Геоэффективности разных типов течений солнечного ветра.

Таблица 2. Длительности разных типов солнечного ветра.

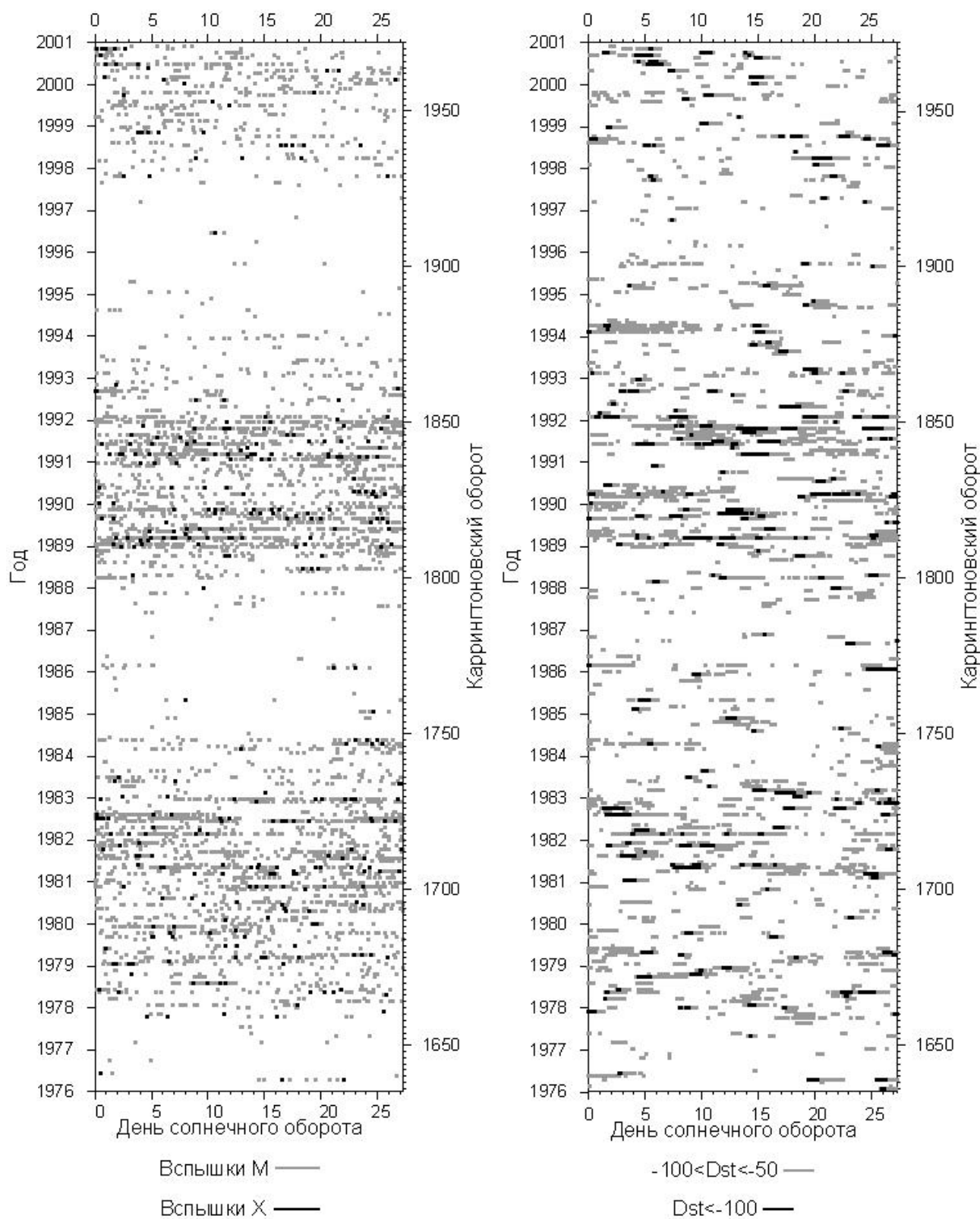


Рис.1. Время появления солнечных рентгеновских вспышек класса M и X (левая панель, серые и черные интервалы, соответственно) и геомагнитных возмущений умеренной и сильной интенсивности (правая панель, серые и черные интервалы: для $-100 < Dst < -50$ нТл и $Dst < -100$ нТл, соответственно), за 1976 – 2000 г (вертикальная ось) в зависимости от суток 27-дневного Каррингтоновского оборота Солнца (горизонтальная ось).

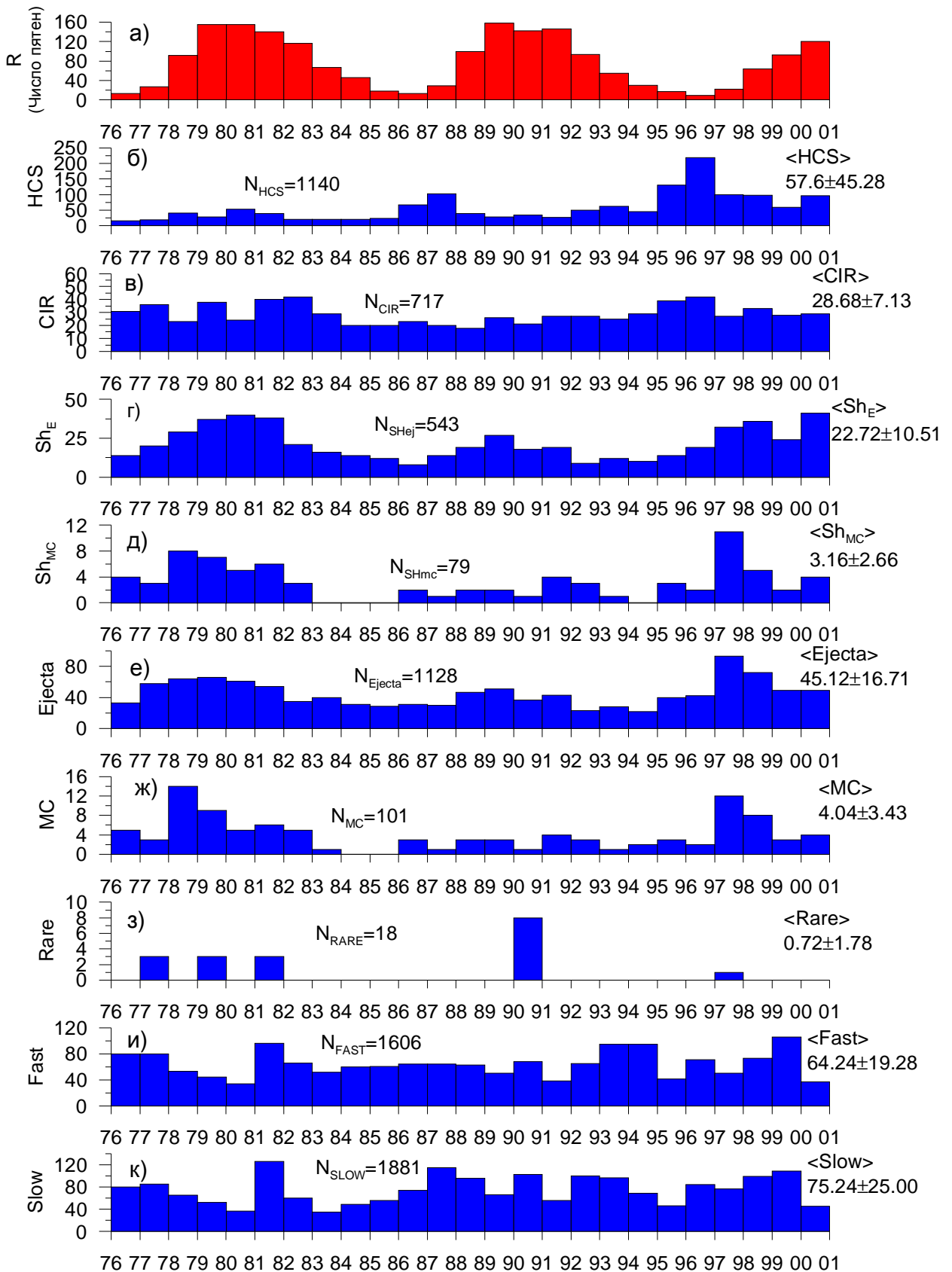


Рис.2. Изменение по годам среднегодовых чисел (а) солнечных пятен, (б) HCS, (в) CIR, (г) Sheath перед Ejecta (Sh_E), (д) Sheath перед MC (Sh_{MC}), (е) Ejecta, (ж) MC, (з) Rare, (и) Fast, (к) Slow. События Ejecta и MC включают все подтипы.

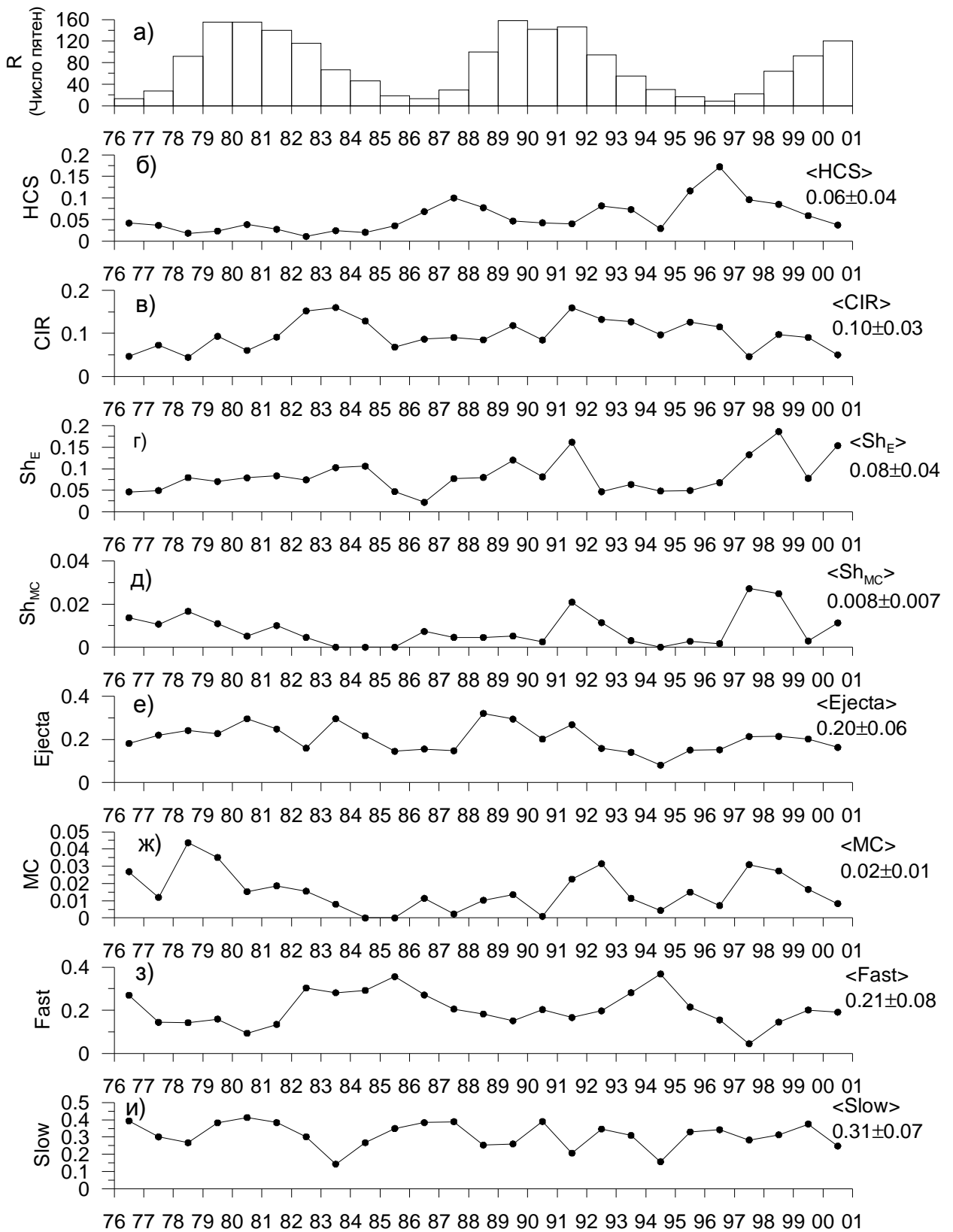


Рис.3. Отношение длительности наблюдения каждого типа солнечного ветра к полной длительности наблюдений (с измерениями плазмы и магнитного поля) в году. Справа на каждой панели приведены годовые значения, усредненные за весь период, со среднеквадратичными отклонениями.

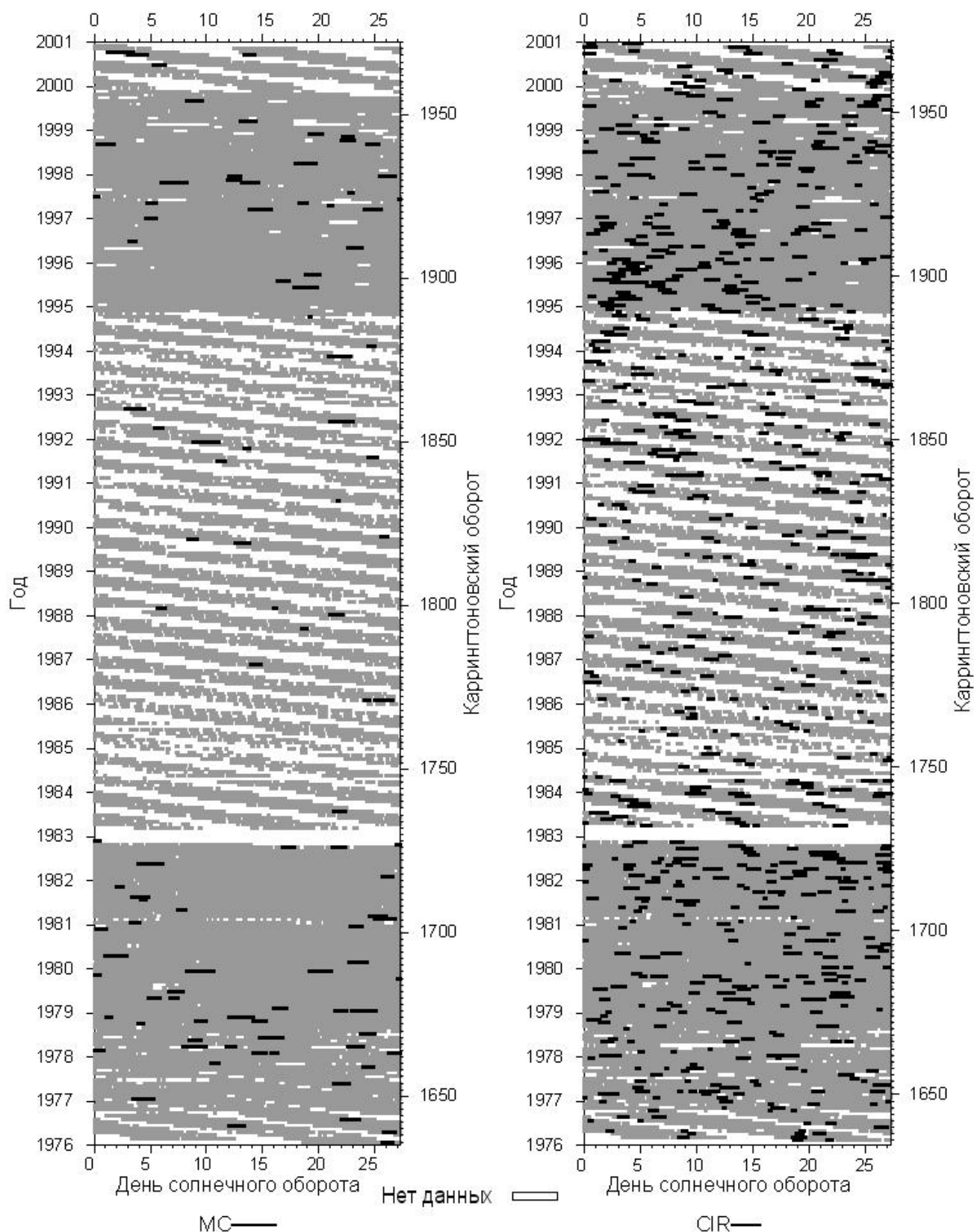


Рис. 4. Время появления событий МС (левая панель, черные интервалы), и событий CIR (правая панель, черные интервалы) за 1976 – 2000 г представлены как на рис.1. Серым цветом обозначены периоды с наличием данных плазмы и магнитного поля, белым цветом показаны интервалы с отсутствием данных.

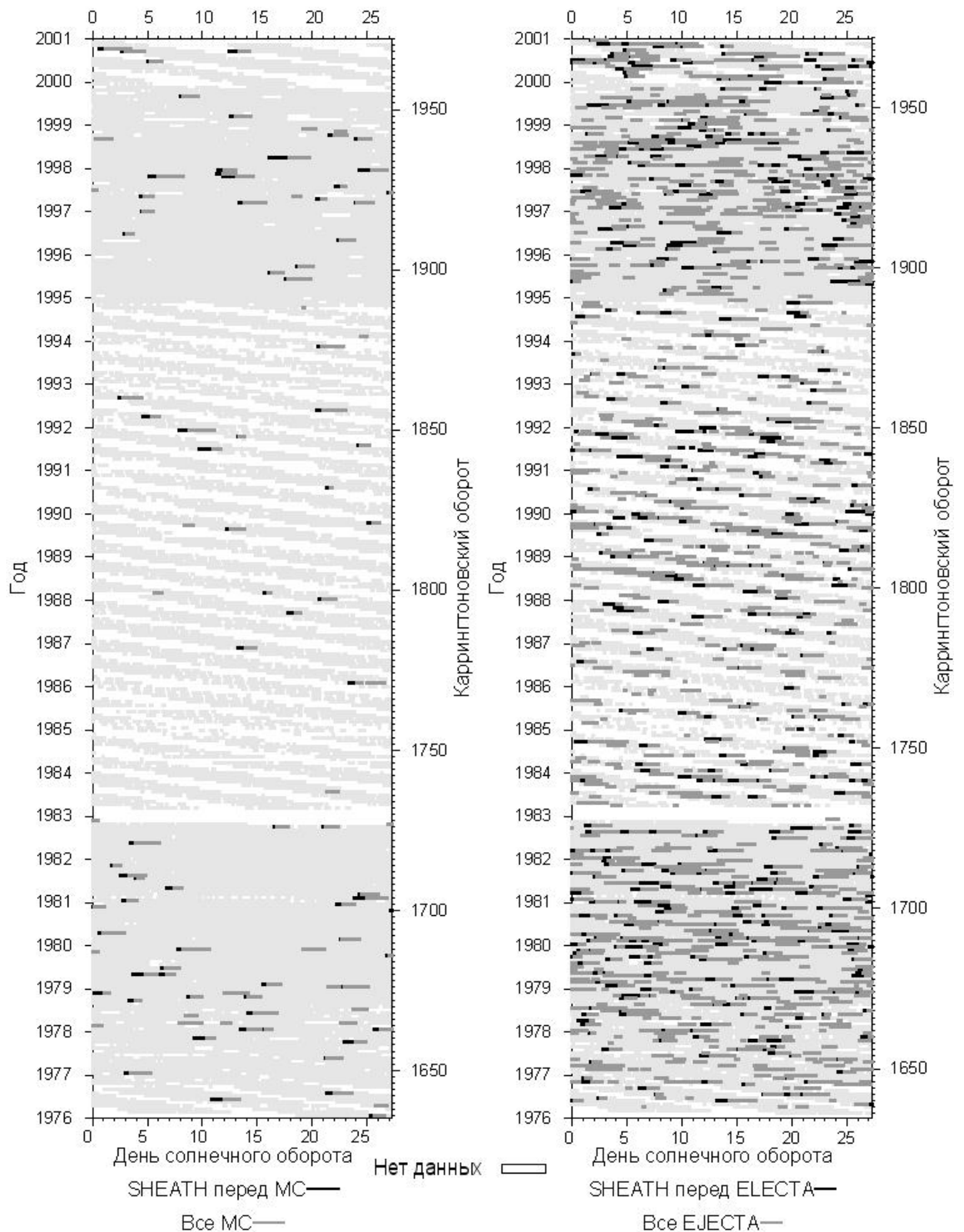


Рис. 5. Время появления событий MC (левая панель: все MC - темно-серые интервалы, Sheath перед MC – черные интервалы), и событий Ejecta (правая панель: все Ejecta - темно-серые интервалы, Sheath перед Ejecta – черные интервалы) за 1976 – 2000 г представлены как на рис.1. Светло-серым цветом обозначены периоды с наличием данных плазмы и магнитного поля, белым цветом показаны интервалы с отсутствием данных.

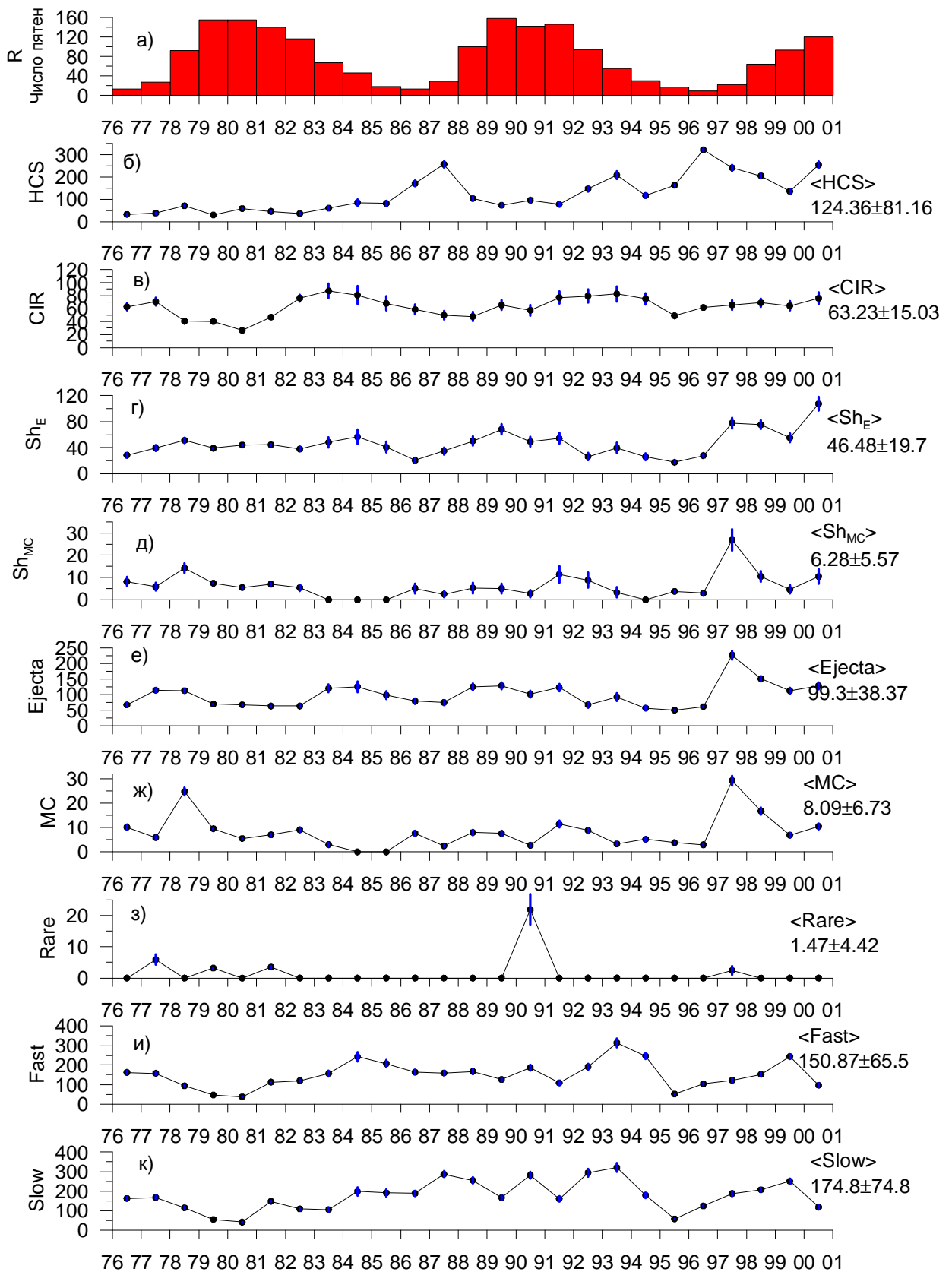


Рис.6. То же, что на Рис.2, но с нормировкой (т.е. с учетом пропусков данных).

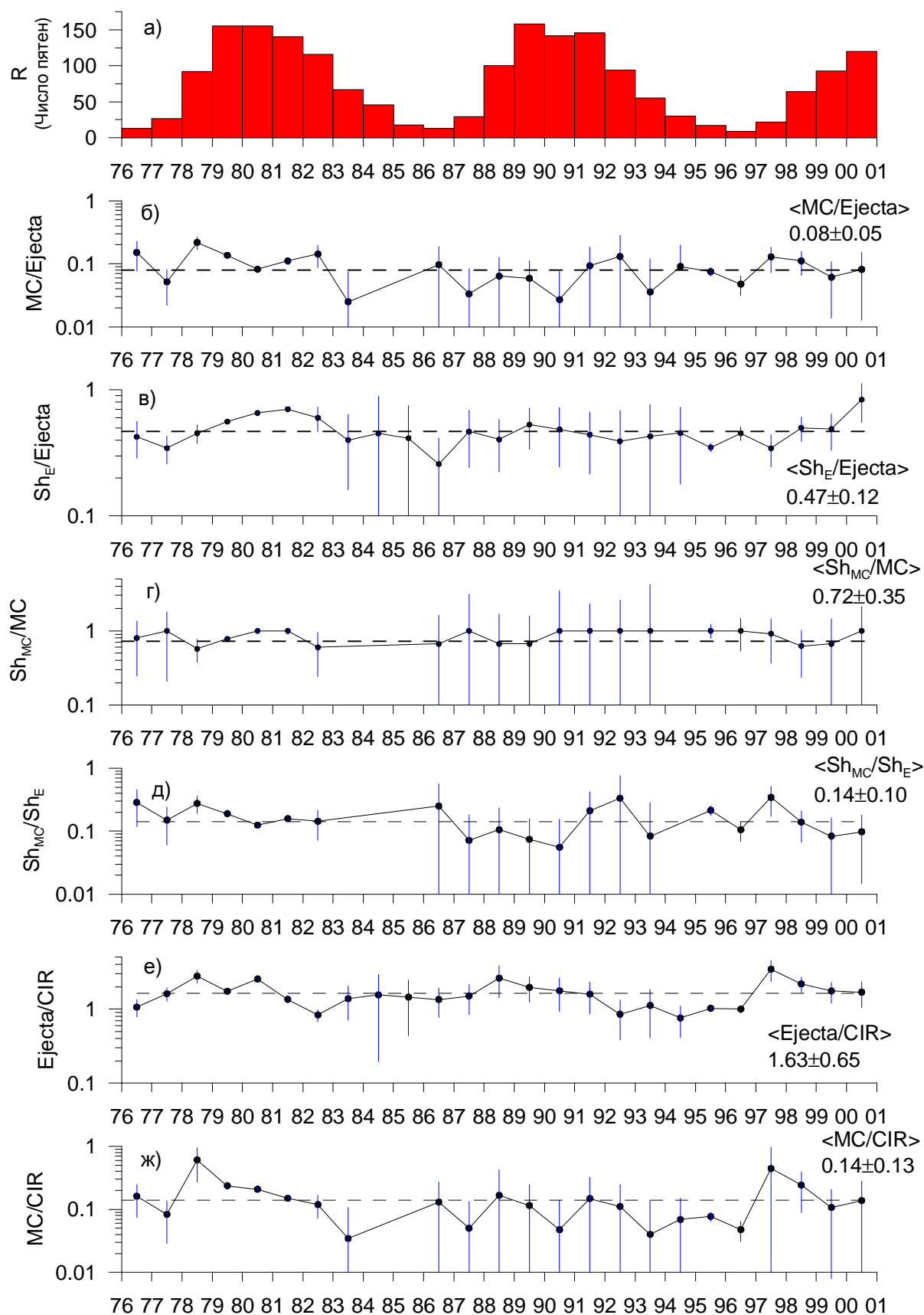


Рис. 7. Изменение по годам (а) чисел пятен и отношений среднегодовых чисел: (б) $MC/Ejecta$, (в) $Sh_E/Ejecta$, (г) Sh_{MC}/MC , (д) Sh_{MC}/Sh_E , (е) $Ejecta/CIR$, (ж) MC/CIR . Справа на каждой панели приведены годовые отношения, усредненные за 1976 – 2000 г со среднеквадратичными отклонениями.

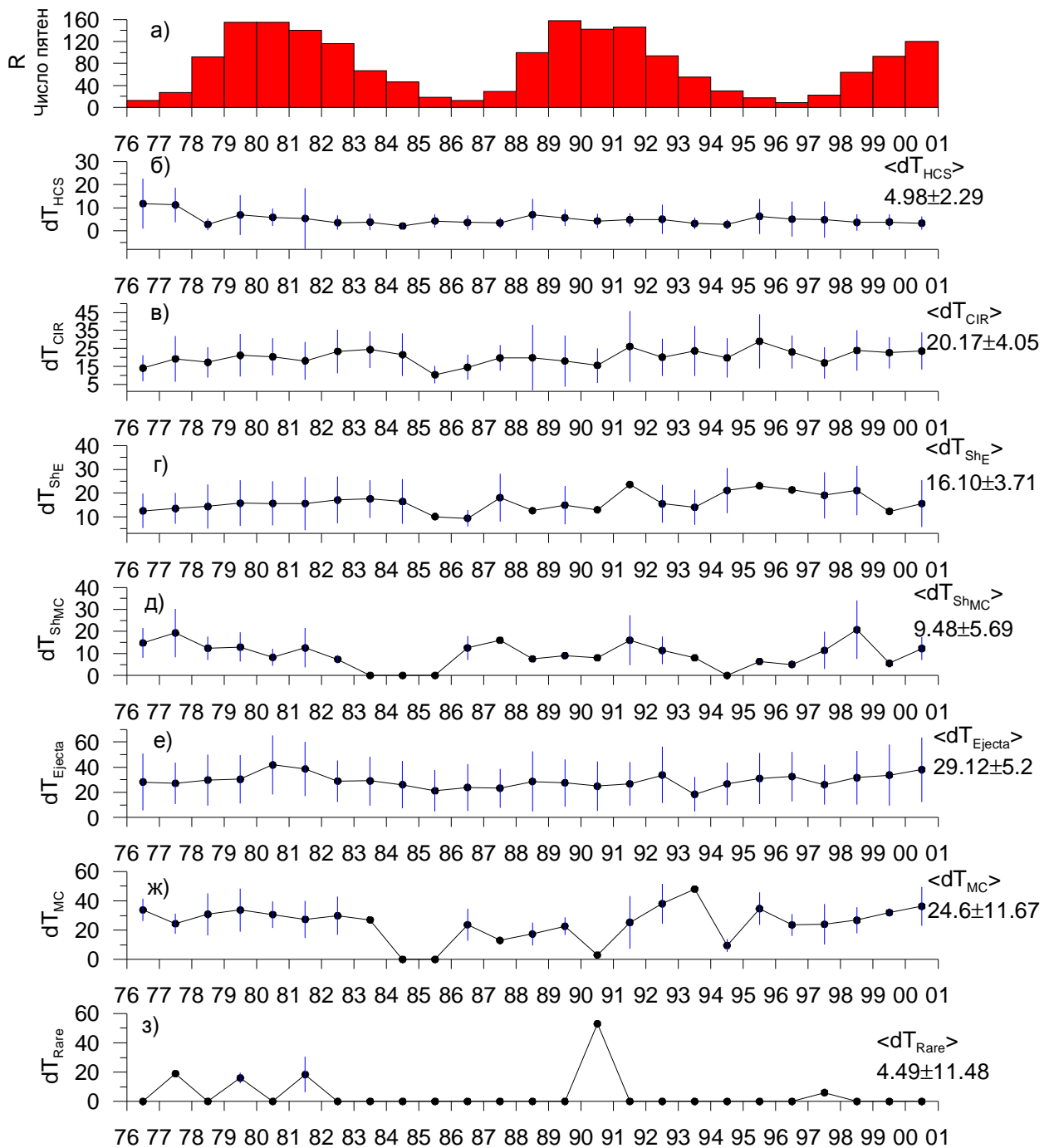


Рис.8. Изменение по годам среднегодовых (а) чисел солнечных пятен, и длительностей разных типов потоков солнечного ветра: (б) HCS, (в) CIR, (г) Sheath перед Ejecta (Sh_E), (д) Sheath перед MC (Sh_{MC}), (е) Ejecta, (ж) MC, (з) Rare. События Ejecta и MC включают все подтипы.

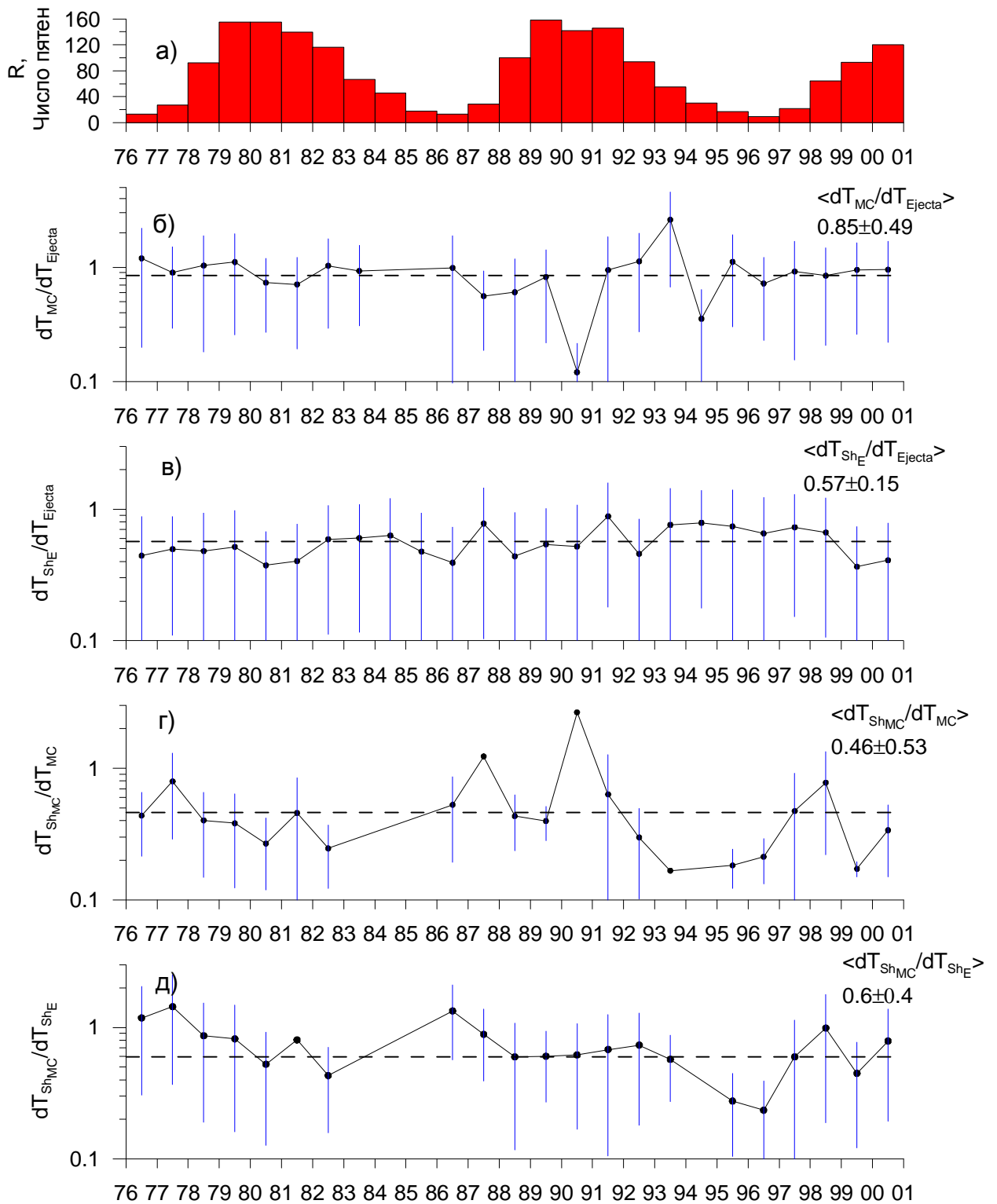


Рис.9. Изменение по годам: (а) годовых чисел солнечных пятен, и отношений длительностей: (б) для событий MC и Ejecta, dT_{MC}/dT_{Ejecta} ; (в) для событий Sheath перед Ejecta и Ejecta, dT_{ShE}/dT_{Ejecta} ; (г) для событий Sheath перед MC и MC, dT_{ShMC}/dT_{MC} ; (д) для событий Sheath перед MC и перед Ejecta, dT_{ShMC}/dT_{ShE} . События Ejecta и MC включают все подтипы. Пунктирные линии на панелях (б-д) показывают отношение длительностей, усредненное за 1976-2000 г.

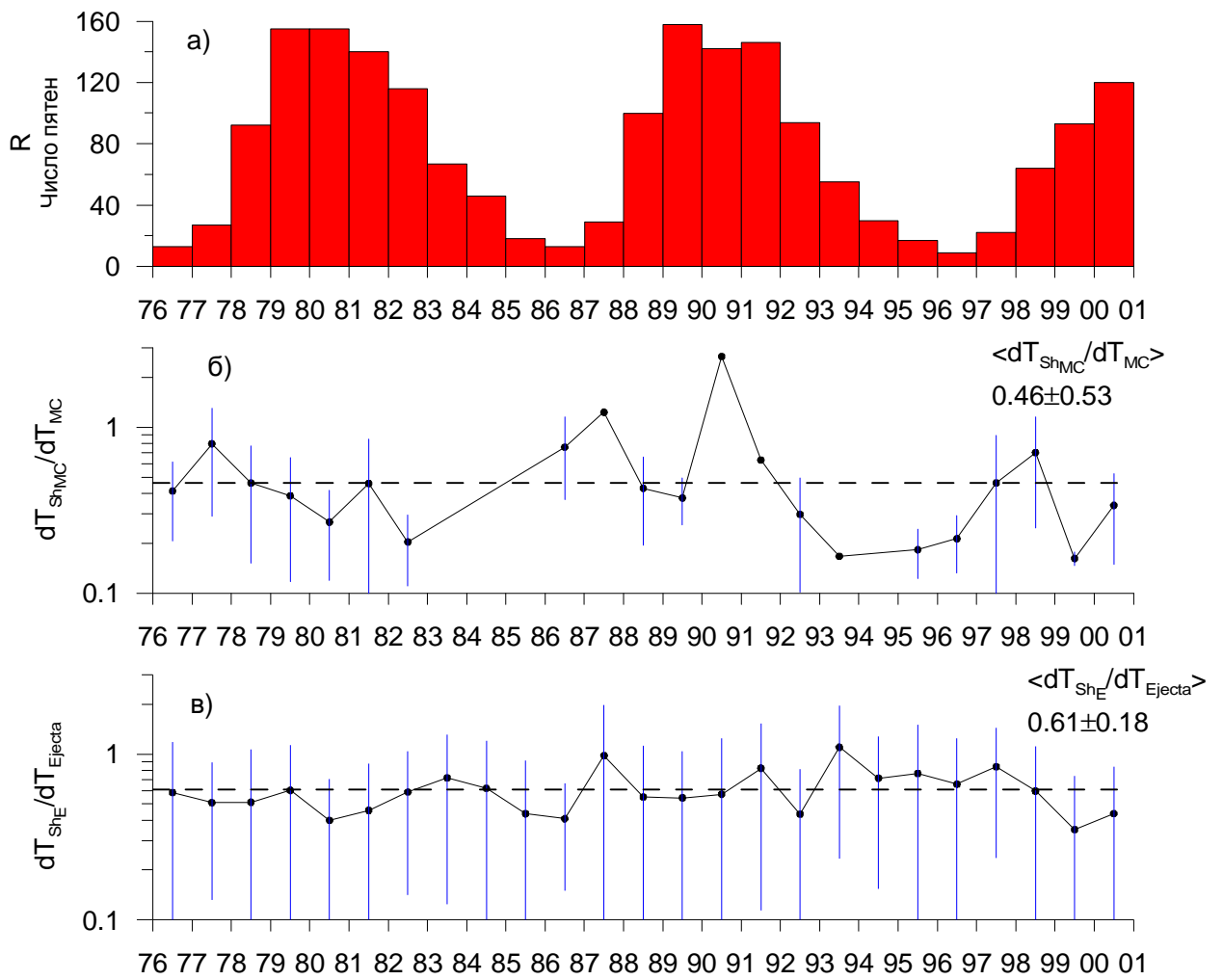


Рис.10 Изменение по годам: (а) годовых чисел солнечных пятен, и отношения среднегодовых длительностей, примыкающих по времени: (б) Sheath и MC, dT_{ShMC}/dT_{MC} ; (в) Sheath и Ejecta, dT_{ShE}/dT_{Ejecta} . Среднегодовые отношения длительностей оценивались по отношению среднегодовых длительностей. Пунктирные линии на панелях (б,в) показывают отношение длительностей, усредненное за 1976 – 2000 г.

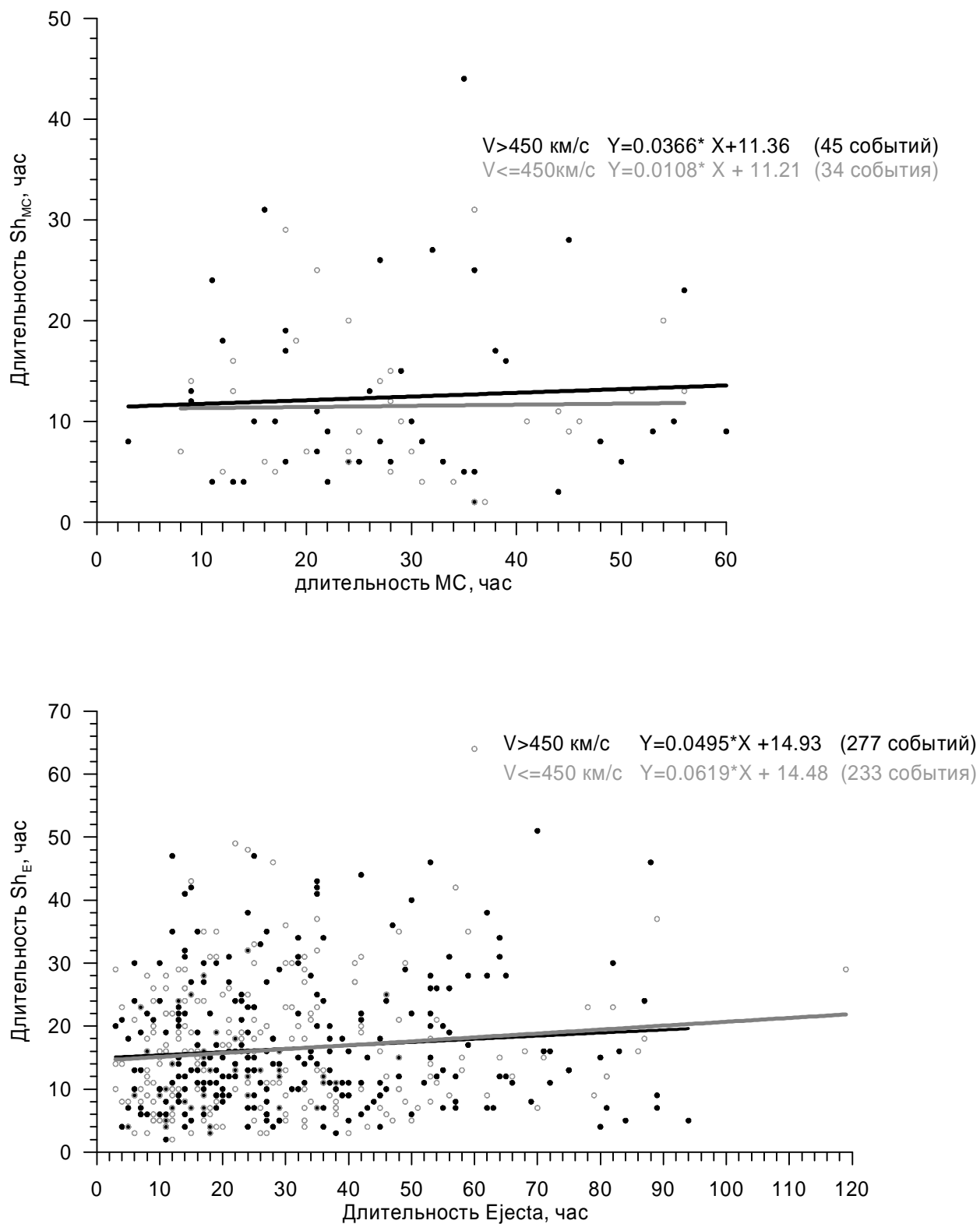


Рис.11 Зависимости (а) длительности dT_{ShE} от длительности dT_{Ejecta} , движущегося со скоростью $V < 450$ км/с (светлые точки) и $V > 450$ км/с (черные точки), (б) длительности dT_{ShMC} от длительности dT_{MC} , движущегося со скоростью $V < 450$ км/с (светлые точки) и $V > 450$ км/с (черные точки). Черная и серая линии показывают линейную аппроксимацию для 2-х типов событий с разными скоростями.

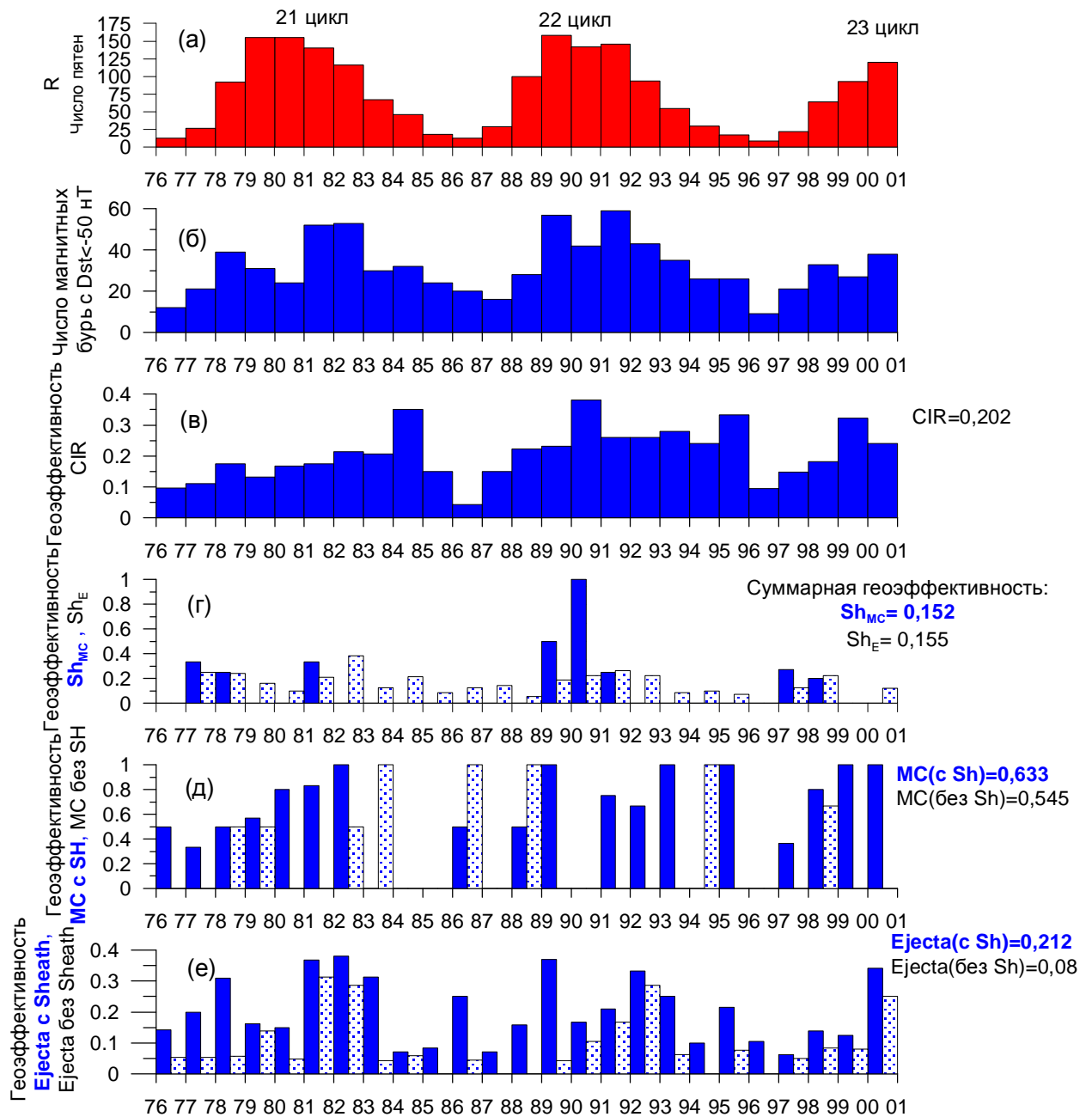


Рис.12. Изменение по годам: (а) солнечных пятен, (б) магнитных бурь, и геоэффективностей (в) CIR, (г) Sh_E , (серый цвет) и Sh_{MC} (черный цвет) (д) MC с Sheath (черный цвет) и MC без Sheath (серый цвет), (е) Ejecta с Sheath (черный) и Ejecta без Sheath (серый). Справа приведены величины суммарных за 1976 – 2000 г геоэффективностей каждого типа событий.

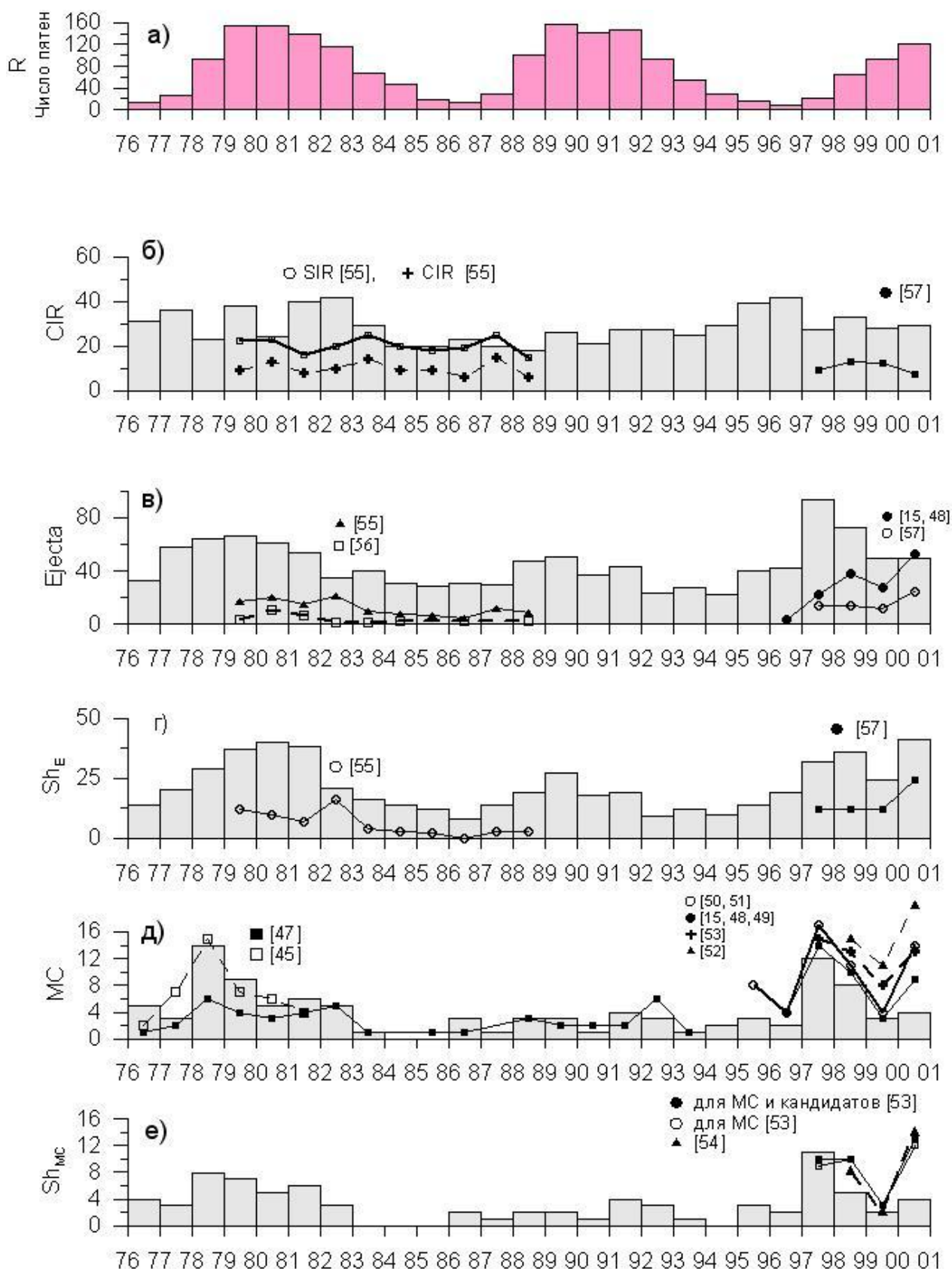


Рис. 13. Вариации годовых чисел: (а) пятен, (б) CIR, (в) Ejecta, (г) Sh_E , (д) MC, (е) Sh_{MC} по данным базы OMNI (гистограммы) и по данным других авторов (точки и линии).

Таблица 1. Геоэффективности разных типов течений солнечного ветра.

Тип событий	Всего событий	Из них с бурей Dst<-50 нТ	Геоэффективность событий
CIR	717	145	0,202
Sh _{MC}	79	12	0,152
Sh _E	543	84	0,155
MC с Sh	79	50	0,633
MC без Sh	22	12	0,545
Ejecta с Sh	543	115	0,212
Ejecta без Sh	585	46	0,078

Таблица 2. Длительности разных типов солнечного ветра

Тип С.В.	Средняя длительность <dT> час	Длительность, в час, по др. работам	Ссылка на работу
HCS	4.98±2.29		
CIR	20.17±4.05	32.5 (7 – 122) 24 – 48 (4.5±0.2) суток	[55] SIR [55] (5.3 a.e.) [71]
Sh _E	16.10±3.71	16% <dT _{ICME} > 6 – 12	[55] [72]
Sh _{MC}	9.48±5.69		
Ejecta/ICME	29.12±5.2	30.4 (6 – 86.4) 23.2 (18 – 30) 3.4 ±0.4 суток 30.4 (6 – 86.4)	[61] [55] (5.3 a.e.) [71] [61]
MC	24.6±11.67	Неск. час – неск. Суток 21.2 (3 – 55) (10 – 46) 21.1 (2 – 30)	[54] [73] [52] [50]
Rare	4.49±11.48	1 – 35	[74]

