

УДК 532+532.31

СОЛНЕЧНЫЕ И МЕЖПЛАНЕТНЫЕ ИСТОЧНИКИ ГЕОМАГНИТНЫХ БУРЬ: АСПЕКТЫ КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ

© 2009 г. Ю.И. Ермолаев, М.Ю. Ермолаев

Институт космических исследований РАН, г. Москва, Россия

Приведен краткий обзор современных представлений о солнечно-земных связях, отвечающих за передачу солнечных возмущений и генерацию магнитных бурь на Земле. Даны количественные оценки вероятности возбуждения магнитных бурь различными солнечными и межпланетными явлениями; сравнивается эффективность процессов генерации бурь различными типами течений солнечного ветра.

Ключевые слова: магнитные бури, вспышки, выбросы корональной массы, магнитные облака.

Введение

С развитием технических возможностей и расширением наших знаний о природе все очевиднее становится, что космические факторы влияют не только на различные технологические системы космического и наземного базирования [Liljensten, 2007; Плазменная гелиогеофизика, 2008], но и оказывают существенное воздействие на биологические объекты, включая человеческий организм [Плазменная гелиогеофизика, 2008]. Часто при исследовании влияния космических факторов одним термином «космическая погода» определяется совокупность достаточно разнородных по своей физической сущности явлений, в связи с чем употребление этого термина в каждом конкретном случае требует уточнения. Фактически, к настоящему времени сложился раздел научных знаний, называемый «Солнечно-земные связи», который предполагает изучение совокупности всех возможных взаимодействий гелио- и геофизических явлений. Структура солнечно-земных связей схематически представлена на рис. 1.

Сегодня ни в отечественных, ни в зарубежных публикациях практически невозможно найти систематического описания положений рассматриваемого раздела, так как он является не только меж-, но и многодисциплинарным, включая в себя элементы целого ряда наук. Эти элементы чаще всего представляются в специализированной литературе по тем или иным научным направлениям и часто оказываются вне поля зрения

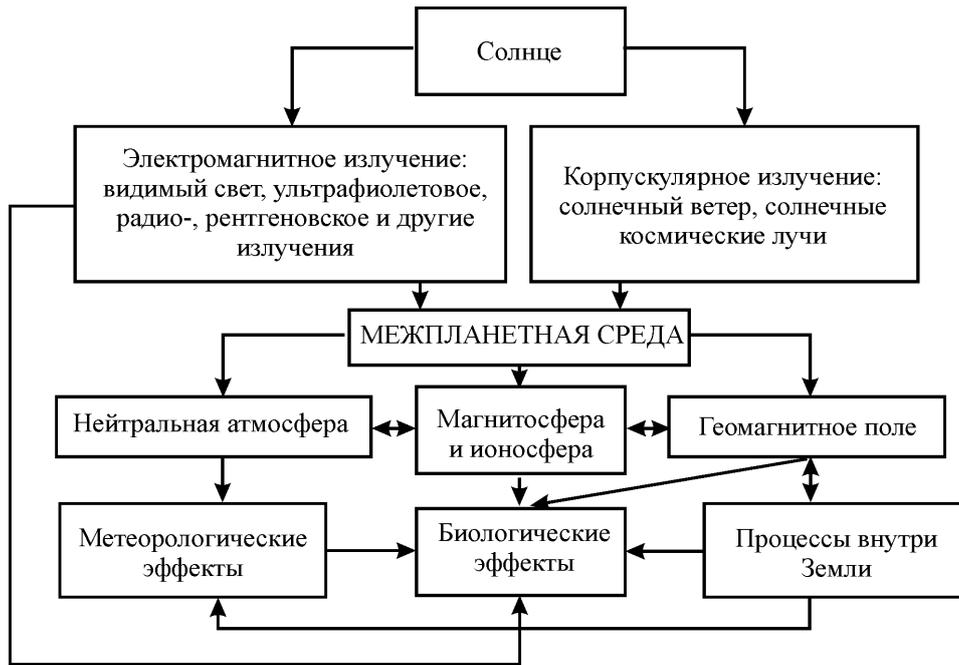


Рис. 1. Схема структуры солнечно-земных связей

специалистов смежных направлений. Наиболее полное изложение вопросов, связанных с изучением солнечно-земных связей, можно найти в уже упоминавшейся монографии [Плазменная гелиогеофизика, 2008] и в изданной в 1986 г., но не теряющей своей актуальности по сей день энциклопедии под редакцией Р.А. Сюняева [Физика космоса, 1986]. Важно подчеркнуть, что обе эти книги изданы на русском языке – это делает их доступными широким кругам российских исследователей.

Авторы настоящей статьи сочли необходимым прежде, чем перейти к представлению основных результатов своей работы, дать сжатое популярное описание некоторых основных элементов рассматриваемой системы. По мнению авторов, такое описание облегчит понимание дальнейшего изложения даже неспециалистами. Помимо всего прочего, в настоящее время отсутствует устоявшаяся общепринятая терминология, что часто становится препятствием при обсуждении проблем солнечно-земных связей. Авторы для обозначения описываемых процессов и явлений используют аббревиатуры, производные от их названий, принятых в англоязычной научной литературе (при первом упоминании процесса или явления его полное название на английском языке приводится в скобках).

1. Основные используемые термины и определения

Говоря о солнечно-земных связях, необходимо сразу подчеркнуть, что существуют два канала передачи энергии от Солнца к Земле – *электромагнитное* и *корпускулярное излучения*. Первое из них считается основным: именно по нему к Земле поступает основная доля энергии Солнца – на каждый квадратный метр земной поверхности приходит около 1.37 кВт. Этот поток энергии лежит преимущественно в видимом и инфракрасном диапазонах длин волн и отличается постоянством – его изменения не превышают долей процента, благодаря чему он даже носит название *солнечная постоянная*.

Достигая Земли за 8 мин, поток, который поглощается в основном атмосферой и поверхностью Земли, играет важную роль в атмосферной погоде.

Электромагнитное излучение в ультрафиолетовом и рентгеновском диапазонах претерпевает значительные изменения при развитии активных процессов на Солнце. Потоки энергии в названных диапазонах крайне малы – даже когда во время сильнейших солнечных вспышек поток рентгеновского излучения возрастает на три порядка, суммарный поток энергии остается на шесть порядков меньше солнечной постоянной. При этом следует помнить, что названные излучения практически полностью поглощаются атмосферой Земли.

Второй канал – корпускулярное излучение – является ключевым в «космической погоде» и именно он будет рассматриваться в дальнейшем.

Корпускулярное излучение состоит из солнечного ветра и космических лучей. В последнее время космические лучи принято называть *энергичными частицами*, что лучше отражает их физическую сущность, так как они представляют собой заряженные частицы (электроны, протоны и ионы), разогнанные до колоссальных (часто релятивистских) скоростей. Эти частицы бывают *галактического* и *солнечного* происхождения. Первые рождаются за пределами Солнечной системы. В среднем, их поступление на орбиту Земли меньше поступления частиц солнечного происхождения. Возрастание активности Солнца приводит к уменьшению потока этих частиц. Во время активных процессов на Солнце (вспышки, разрушение арок, корональные выбросы и т.п.) и в межпланетной среде (главным образом, на ударных волнах) происходит ускорение энергичных частиц солнечного происхождения.

По существу, энергичные частицы – это радиация, которая может проникать внутрь тел и разрушать молекулы живой и неживой природы. К счастью, поверхность Земли надежно защищена магнитосферой и атмосферой. Однако во время космических полетов и даже трансарктических перелетов на самолете энергичные частицы могут представлять ощутимую опасность и для людей, и для электронных устройств. Именно под воздействием радиации выходит из строя значительная часть приборов космических аппаратов. Например, с этой причиной связываются сбои в работе научной аппаратуры на космических аппаратах SOHO и ACE в октябре–ноябре 2003 г. [Веселовский и др., 2004].

Плазма солнечной короны имеет температуру до $2 \cdot 10^6$ К, в связи с чем она не может быть полностью удержана гравитационным полем Солнца и «убегает» в межпланетное пространство, заполняя собой гелиосферу. Хотя почти вся Солнечная система находится внутри солнечной короны, плазму, удаленную от Солнца на расстояние более нескольких солнечных радиусов и имеющую характеристики, которые значительно отличаются от характеристик плазмы в основании короны, принято называть *солнечным ветром*. Солнечный ветер, обладающий скоростью в среднем 400 км/с, достигает Земли за 2–5 сут. При этом на орбите Земли его плотность составляет несколько ионов в 1 см^3 , что практически «недостижимо» в условиях наземных экспериментальных установок. Тем не менее, солнечный ветер оказывается основным агентом, переносящим энергию от Солнца к магнитосфере Земли и ее внешним оболочкам.

Происходящие в рассматриваемой системе медленные изменения, для которых характерно время порядка месяцев и более, сейчас иногда называют «Космическим климатом». Если их исключить из рассмотрения, то останется динамическая часть, характеризующаяся быстрыми отклонениями от некоторой усредненной картины, которая является предметом исследований при изучении «Космической погоды».

Авторы ограничатся описанием лишь небольшой части представленной схемы – будет рассмотрена передача возмущения от Солнца к магнитосфере Земли посредством солнечного ветра. При этом основное внимание будет уделено последним результатам исследования источников наиболее сильных типов возмущений магнитосферы – магнитных бурь на Земле.

В последние годы в гелиобиофизике, занимающейся проблемой воздействия факторов «космической погоды» на биологические объекты, включая человека, исследования роли магнитных бурь приобретают все большее значения. В этом направлении уже получены существенные результаты [Villoresi et al., 1994; Гурфинкель, 2004; Зенченко, Бреус, 2008; Kleimenova et al., 2008] и намечены пути снижения риска серьезных последствий для человека путем принятия превентивных мер при приближении магнитных бурь. Однако подобных исследований к настоящему моменту проведено явно недостаточно, что в основном связано с их сложностью и междисциплинарностью и необходимостью определенных знаний в смежных областях науки. В частности, эти исследования ограничивались лишь сопоставлением с самим фактом появления магнитных бурь. Серьезные сопоставления биологических откликов на магнитные бури с их свойствами и происхождением в настоящее время отсутствуют, так как для этого необходимы знания о магнитных бурях и их источниках. Гелиобиофизики, как правило, мало знакомы с физикой Солнца и солнечно-земными связями. Они формально и не всегда физически оправдано используют индексы геомагнитной активности и их ранжирование по уровню активности. Данная статья, предназначенная для широкого круга читателей, написана авторами с целью прояснения ряда вопросов, касающихся происхождения и характера геомагнитных бурь, ранжирования индексов геомагнитной активности и адекватности применения последних при решении различных практических задач.

Сказанное показывает, что исследование солнечных и межпланетных источников геомагнитных бурь остается актуальной и важной задачей «Космической погоды» и ее многочисленных практических приложений. Общая концепция наших представлений об источниках бурь не менялась в течение многих лет: основным источником магнитосферных возмущений является отрицательная (южная) B_z -компонента межпланетного магнитного поля (ММП), так как в этом случае магнитосфера становится открытой, энергия может поступать из солнечного ветра в магнитосферу и приводить к магнитным бурям. Обычно ММП лежит в плоскости эклиптики и не содержит какую-либо из компонент B_z ; только возмущенные типы солнечного ветра могут содержать B_z -компоненту ММП, включая и южную.

Согласно современным представлениям существуют две основные цепочки (два сценария) передачи энергии от Солнца к магнитосфере. (Поскольку уже отмечались терминологические сложности описываемого раздела науки, далее авторы будут приводить последовательно русские и английские названия тех или иных процессов и явлений и использовать аббревиатуры, производные от английских обозначений). Итак, первый сценарий: 1. Солнечное возмущение (солнечная вспышка и выброс корональной массы – *Coronal Mass Ejection*, далее *CME*) → межпланетное *CME* (*ICME*, *Ejecta* и магнитное облако – *Magnetic Cloud*, далее *MC*), включающее южную компоненту B_z ММП → магнитная буря. Второй сценарий: 2. Корональные дыры, формирующие быстрые потоки солнечного ветра → взаимодействие быстрого потока с предшествующим медленным потоком и образование области сжатия и деформации ММП (*Corotating Interaction Region*, далее *CIR*), включающей южную компоненту B_z ММП → магнитная буря. Хотя проблема механизмов передачи энергии изучается на протяжении долгого времени и к настоящему времени накоплен значительный объем эксперимен-

тальной и теоретической информации (см., например, [Lilensten, 2007; Schwenn, 2006; Pulkkinen, 2007] и ссылки в них), она до сих пор окончательно не решена.

С одной стороны, проводимые исследования охватывают длинную цепочку пространственных областей с различными физическими процессами, носят междисциплинарный характер и требуют совместных усилий ученых различных специальностей. С другой стороны, между известными нам областями существуют некоторые области, о которых нет практически никакой экспериментальной информации, и можно только предлагать гипотезы о взаимосвязях между ними. Например, есть данные о Солнце и околосолнечном пространстве, полученные методами дистанционного зондирования, есть прямые измерения в околоземном пространстве, но нет практически никакой информации об области между околосолнечным и околоземным пространством из-за отсутствия там измерений. Точно так же нам практически ничего неизвестно и о тонких фронтах головной ударной волны и магнитопаузы из-за слишком быстрого движения границ относительно спутника. Поэтому в данной статье не будут рассматриваться проблемы тех областей, для которых имеются экспериментальные данные, – они подробно обсуждаются в специальной литературе. Внимание авторов будет сконцентрировано на «интерфейсе» между этими областями, который, как правило, выпадает из специальной литературы.

В предыдущих работах авторов статьи [Ермолаев, Ермолаев, 2003б; Yermolaev et al., 2005a; Yermolaev, Yermolaev, 2006] было показано, что количественные соотношения между различными явлениями сильно зависят от используемых методических подходов. Поэтому в следующих далее разделах будут обсуждаться вопросы влияния количественных определений явлений и направлений их сопоставления на получаемые оценки корреляции между этими явлениями. После этого будут представлены некоторые оценки установленных корреляций на основе многочисленных наблюдений. Наконец, будет показано, что в большинстве случаев генерация магнитных бурь помимо южной V_z -компоненты ММП характеризуется определенным поведением других параметров солнечного ветра. Это позволяет предположить, что магнитные бури, возбуждаемые возмущенной областью сжатия плазмы перед *Ejecta/MS*, *MC* и *CIR*, могут генерироваться посредством различных физических механизмов.

Необходимо отметить, что существует двоякое толкование слова «геоэффективность» (*geoeffectiveness*). В одном случае под «геоэффективностью» понимается вероятность, с которой то или иное явление может вызвать магнитную бурю, т.е. отношение числа событий выбранного типа, приведших к магнитной бури, к полному числу этих событий. В другом – под «геоэффективностью» понимается эффективность процесса генерации бури для однозначно связанных между собой явлений, т.е. отношение между «выходом» и «входом» физического процесса, например, между величиной D_{st} -индекса и величиной южной V_z -компоненты ММП.

2. Явления на Солнце

Данные о явлениях на Солнце имеют определенную специфику. В отличие от данных о межпланетных или магнитосферных явлениях, полученных путем прямых измерений параметров, данные о солнечных явлениях получаются с использованием дистанционных измерений (наземного или околоземного космического базирования) солнечной атмосферы в различных частотных диапазонах электромагнитных волн. Частота излучения определяется условиями в излучающем объеме плазмы (в основном, концентрацией) и, вообще говоря, измерения, выполненные в разных частотных диапазонах,

дают характеристики разных областей Солнца. Определение динамики солнечного явления, включая его пространственное перемещение (особенно вдоль луча зрения), является достаточно сложной и неоднозначной задачей, так как в этом случае различные составляющие явления, чьи характеристики и положение меняются во времени, должны наблюдаться различными приборами. При этом предполагается, что выполненные различными приборами измерения, могут быть использованы для изучения одного и того же явления.

Солнечные вспышки были первыми измерены в оптическом диапазоне длин волн с помощью наземных приборов, именно на основе оптических наблюдений была сделана их первая классификация (см., например, [Krajcovic, Krivsky, 1982]). Однако с началом космической эры стали возможны орбитальные наблюдения Солнца в рентгеновском диапазоне, недоступные для наземных измерений; классификация рентгеновских вспышек была сделана на базе измерений на спутниках серии GOES (см. <http://www.ngdc.noaa.gov/stp/GOES/goes.html>). Оптическое и рентгеновское излучения образуются на разных стадиях солнечных вспышек и в разных их областях. Таким образом, величины (классы) вспышки, определенные двумя разными методами, имеют разную физическую природу.

Соотношения между оптической и рентгеновской величинами солнечных вспышек для периода 1976–2000 гг. представлены на рис. 2. Показаны все вспышки с рентгеновской величиной $M5$ и выше, которые обычно рассматриваются в качестве кандидатов на источники межпланетных и магнитосферных возмущений [Ермолаев, Ермолаев, 2003б; Yermolaev, Yermolaev, 2006]. Рисунок наглядно демонстрирует, что корреляция существует только в статистическом смысле, так как отдельные события одновременно могут иметь высокий оптический класс и низкий рентгеновский класс и наоборот.

В течение долгого времени все возмущения в солнечном ветре и в земной магнитосфере связывались исключительно с солнечными вспышками. На рис. 3 слева показаны все рентгеновские вспышки высокого класса M и экстремального класса X (серые и черные квадратики, соответственно). Для того, чтобы вспышки, длительность которых

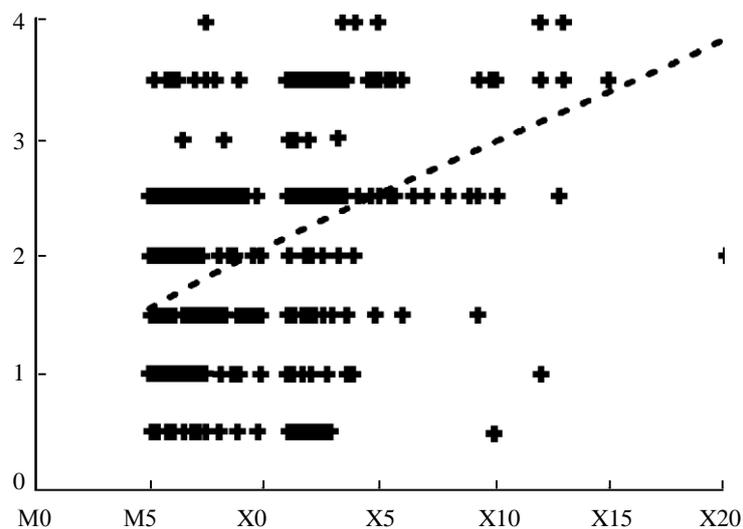


Рис. 2. Соотношение между оптической (вертикальная ось) и рентгеновской (горизонтальная ось) величинами (классами) солнечных вспышек. Проанализированы 643 вспышки с рентгеновским классом $M5$ и выше в период 1976–2000 гг. [Ермолаев, Ермолаев, 2003б; Yermolaev, Yermolaev, 2006]. Штриховая линия – линейная аппроксимация приведенных данных

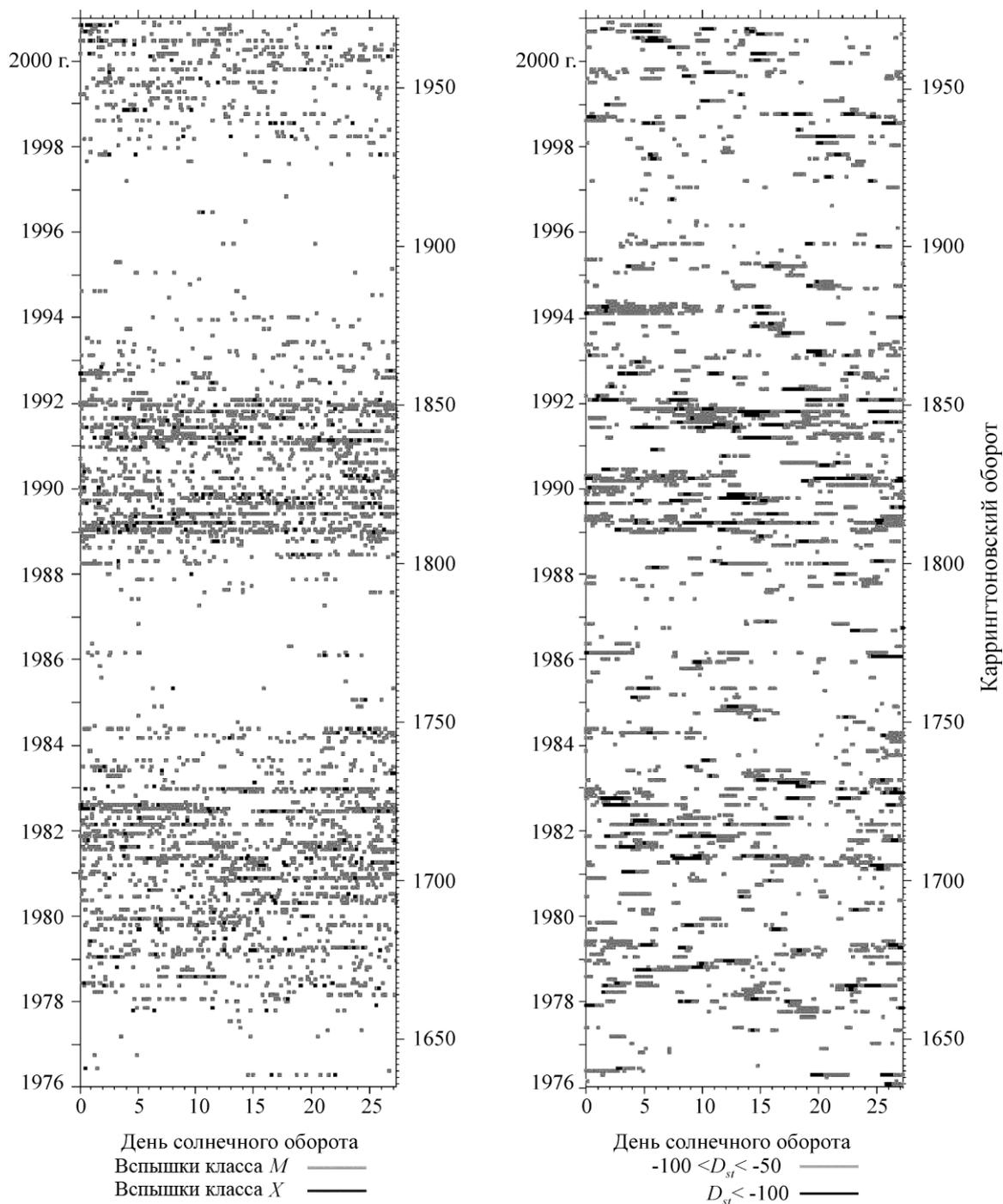


Рис. 3. Временной ход солнечных вспышек (слева) и магнитных бурь (справа) для периода 1976–2000 гг.

составляет от нескольких минут до нескольких десятков минут, были различимы на графике, их длительность была увеличена при построении графика до 6 ч. Справа на рис. 3 представлены все средние ($-50 > D_{st} > -100$ нТ) и сильные ($D_{st} < -100$ нТ) магнитные бури (серые и черные квадратики, соответственно); их длительности на графике соответствуют наблюдаемым в действительности. По оси абсцисс отложены номера суток каррингтоновских оборотов Солнца (около 27 сут), а по оси ординат – годы с 1976 по 2000 г. В целом на временных масштабах нескольких оборотов Солнца наблюдается хорошая корреляция солнечных и магнитосферных событий. Однако попытки

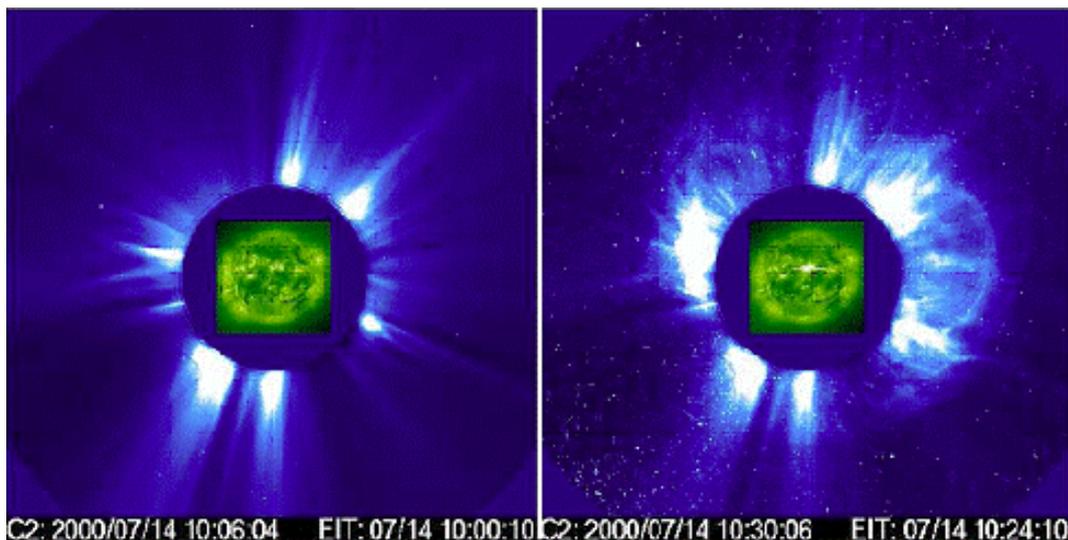


Рис. 4. Суперпозиция изображений в белом свете (SOHO/LASCO, бело-голубое изображение) и в ультрафиолетовом диапазоне (SOHO/EIT, зелено-желтое изображение) для движущегося к Земле *CME* 14 июля 2000 г. (Событие «День Бастилии»). Фон в виде «белого снега» на правой панели обусловлен бомбардировкой детекторов космического аппарата SOHO энергичными частицами, связанными с активностью на Солнце [Gopalswamy, 2002]

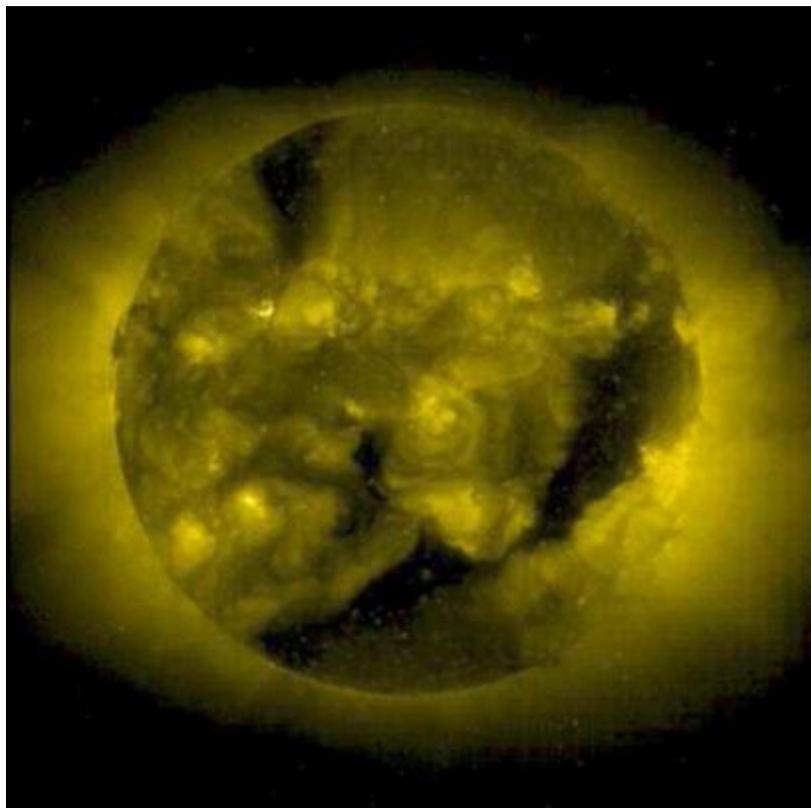


Рис. 5. Изображение нижней короны SOHO/EIT: светлые области – активные области, темные области – корональные дыры [<http://www.lmsal.com/YPOP/ProjectionRoom/latest/eit/full/eit284-128.gif>]

«привязать» конкретные события друг к другу в большинстве случаев оказываются безуспешными, о чем более подробно будет сказано в разделе 4 настоящей статьи.

В начале 70-х годов с помощью коронографов белого света, установленных на космических аппаратах, было открыто другое мощное солнечное явление – выбросы корональной массы (*Coronal Mass Ejection, CME*). В течение достаточно долгого времени они изучались лишь отдельными исследователями и почти не привлекались для рассмотрения цепочки солнечно-земных связей. Однако после появления известной статьи Гослинга [Gosling, 1993] ситуация изменилась, и теперь *CME* рассматривается почти как единственная причина всех межпланетных и геомагнитосферных возмущений, хотя оба физических явления (вспышки и *CME*) тесно связаны между собой (см., например, дискуссии в [Harrison, 1996; Cliver, Hudson, 2002; Yashiro et al., 2005]).

Большой объем данных по *CME* был получен с помощью коронографа LASCO на космическом аппарате SOHO (http://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/). В отличие от вспышек, которые могут наблюдаться на солнечном диске, при изучении геоэффективности *CME* очень важной проблемой является определение положения их источника на солнечном диске и прежде всего вопрос, на какой стороне солнечного диска расположен источник – видимой или обратной. Дело в том, что *CME* наблюдается на двумерных изображениях, на которых с помощью затмевающего диска коронографа из поля зрения прибора «вырезается» Солнце. Чтобы решить эту проблему, наблюдения *CME* в белом свете вне солнечного диска сравниваются с наблюдениями на диске в различных диапазонах длин волн других солнечных явлений, таких как вспышки, ультрафиолетовые и рентгеновские димминги, ультрафиолетовые «уярчения», ультрафиолетовые и рентгеновские постэруптивные аркады и т.д. Пример такого сравнения наблюдений в белом свете и ультрафиолетовом диапазоне показан на рис. 4 [Gopalswamy, 2002]. Таким образом, необходимо постоянно помнить, что полученное указанным выше способом положение источника *CME* является не экспериментальным фактом, а некоторой гипотезой, так как исследователи вынуждены использовать для этого измерения, сделанные, во-первых, разными инструментами, во-вторых, на разных частотах, в-третьих, в разных пространственных областях и, наконец, в-четвертых, в разное время. Поэтому можно лишь статистически рассматривать положение источника *CME* на солнечном диске на основе изображений в других диапазонах длин волн. Существуют экспериментальные факты, что некоторые *CME* приводят к прямым измерениям *Ejecta/MS* («межпланетных *CME*») и магнитосферных возмущений, но не имеют каких-нибудь видимых особенностей на видимом диске Солнца [Zhang et al., 2003]. Если не принимать такого рода *CME* во внимание, то на основании только солнечных наблюдений они могут быть включены в список «*CME* на обратной стороне» и привести к неправильным выводам о геоэффективности *CME* [Ермолаев, 2008].

Корональные дыры в отличие от вспышек и *CME* являются достаточно стабильными солнечными структурами и могут существовать в течение нескольких 27-суточных солнечных оборотов. Корональные дыры имеют открытую конфигурацию магнитного поля, которая позволяет короне образовывать быстрые потоки солнечного ветра (рис. 5).

3. Межпланетные явления

Классификация крупномасштабных событий в межпланетной среде возникла с началом космической эры и развивается по мере накопления данных и знаний о солнечном ветре и его источниках на Солнце. Хотя методы классификации сейчас развиваются достаточно быстро, общие представления о типах солнечного ветра существенно не

изменились. Согласно многочисленным наблюдениям, существует шесть основных крупномасштабных типов течений солнечного ветра (рис. 6, табл. 1).

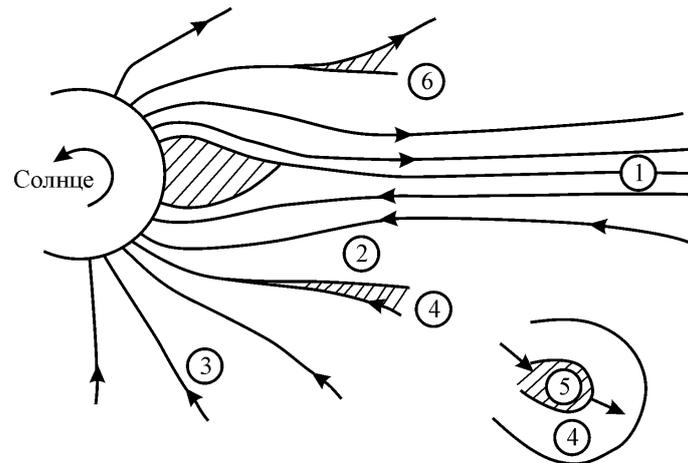


Рис. 6. Схематическое представление крупномасштабных типов солнечного ветра

1 – гелиосферный токовый слой, 2, 3 – медленные (2) и быстрые (3) течения из корональных дыр и стримеров, 4 – сжатая плазма (*CIR* – на границе быстрого и медленного течений; *Sheath* – перед передним фронтом поршня), 5 – поршень (*MC* – магнитные облака, *Ejecta* – «поршни»), 6 – разреженная плазма на фронте медленного и быстрого течений солнечного ветра

Таблица 1

Квazистационарные типы	
1 тип	гелиосферный токовый слой
2 тип	медленный ветер из корональных стримеров
3 тип	быстрый ветер из корональных дыр
Возмущенные типы	
4 тип	сжатые потоки солнечного ветра (<i>CIR</i> , область сжатия между медленным и быстрым потоком и <i>Sheath</i> , область сжатия перед магнитным облаком <i>MC</i> и <i>Ejecta</i>)
5 тип	межпланетное <i>CME</i> (<i>MC</i> и <i>Ejecta</i>)
6 тип	область разряжения

Из приведенных в табл. 1 только два типа – 4-й и 5-й – обладают геоэффективностью, так как они могут включать длительную южную *Bz*-компоненту ММП [Gosling, Pizzo, 1999; Gonzalez at al., 1999; Crooker, 2000; Bothmer, 2004].

Анализ литературы показывает, что не существует уникального метода идентификации межпланетных явлений – различные исследователи используют различные наборы параметров, а также различные численные критерии при их анализе. Например, чтобы идентифицировать магнитное облако, существующие методы включают от 2-х до 10-ти параметров (см. например, [Ермолаев, Ермолаев, 2003б] и ссылки в ней). В литературе существует несколько списков *ICME* (*MC* и *Ejecta*) [Cane, Richardson, 2003; Zhang et al., 2004; Echer et al., 2005] и один список *CIR* [Alves et al., 2006], но нет каких-либо списков других типов потоков солнечного ветра или списков, одновременно включающих различные типы потоков. Авторы приготовили список всех названных выше типов течений солнечного ветра для 1976–2000 гг. на основе каталога измерений солнечного ветра OMNI (см. [Ермолаев и др., 2009] и сайт <ftp://ftp.iki.rssi.ru/pub/omni/catalog/>).

Авторы большого числа статей рассматривают различные типы солнечного ветра как изолированные события и пренебрегают взаимодействием между ними. В большинстве случаев это допущение оправдано, так как размеры перечисленных выше возмущенных типов явлений на орбите Земли (на 1 а.е.) составляют не более нескольких десятков процентов от 1 а.е. и не успевают существенно измениться или диссипировать. Однако отмечалось взаимодействие между *CME* вблизи Солнца [Gopalswamy et al., 2001, 2002] и между магнитными облаками вблизи Земли (см., например, [Burlaga et al., 2001; Berdichevsky et al., 2003; Gonzalez-Esparza et al., 2004; Farrugia et al., 2006a] и ссылки в них). В ряде статей показано, что некоторые сильные магнитные бури, например, такие, как события 31 марта 2001 г. с минимумом $D_{st} = -387$ нТ, 11–13 апреля 2001 г. с $D_{st} = -271$ нТ [Wang et al., 2003]; 28–30 октября 2003 г. с $D_{st} = -363$ нТ [Безеловский и др., 2004; Skoug et al., 2004]; 20 ноября 2003 г. с $D_{st} = -472$ нТ [Ермолаев и др., 2005a; Gopalswamy et al., 2005]; 8–10 ноября 2004 г. с $D_{st} = -373$ нТ [Ермолаев и др., 2005б], были генерированы взаимодействующими друг с другом магнитными облаками. Недавно при изучении межпланетных условий для магнитных бурь в период 1995–2003 гг. [Farrugia et al., 2006b] было обнаружено, что «существенное число наших больших событий (6 из 16) состояли из *ICME/MC*, взаимодействующих друг с другом, образуя комплексные *Ejecta*». Другие авторы [Xie et al., 2006] изучили 37 наблюдавшихся в 1998–2002 гг. долгоживущих магнитных бурь (*Long-Lived GeoMagnetic Storms, LLGMS*) с $D_{st} < -100$ нТ, которые связаны с *CME*, и обнаружили, что 24 из них были вызваны последовательностью *CME* и что число взаимодействующих магнитных облаков составляло от 2 до 4. Этот результат может быть объяснен сжатием магнитных облаков и образованием комплексных структур (комплексных *Ejecta*), которые одновременно обладают свойствами и магнитного облака, и *Sheath* (ниже будет показано, что *Sheath* обладает более высокой эффективностью в генерации бурь, чем тело магнитного облака).

4. Магнитосферные явления

Плазма солнечного ветра и плазма в окрестности Земли – практически идеальные проводники электрического тока. Поэтому, в соответствии с законами магнитной электродинамики, внешняя плазма солнечного ветра и межпланетное магнитное поле не могут вплотную приблизиться к Земле из-за ее сильного магнитного поля. В результате взаимодействия солнечного ветра и межпланетного магнитного поля с плазмой и магнитным диполем Земли образуется полость (*магнитосфера*), на границе (*магнитопаузе*) которой устанавливается баланс давлений плазмы и поля внешнего и внутреннего происхождения. Эта магнитопауза удалена в подсолнечной области на расстояние около 6×10^4 км от Земли (рис. 7).

В первом приближении магнитосфера недоступна для внешней плазмы солнечного ветра, который может лишь изменить форму магнитопаузы в соответствии с условием баланса давлений на ней. Однако в действительности ситуация оказывается более сложной. Когда межпланетное магнитное поле (ММП) обладает компонентой, параллельной земному магнитному диполу (южная компонента ММП), в области соприкосновения противоположно направленных ММП и земного поля происходят нарушение условия идеальной проводимости плазмы и эрозия магнитного поля. В магнитосферу попадают плазма солнечного ветра и переносимая им энергия. Этот процесс называется *пороговым (триггерным) механизмом*. В зависимости от темпа поступления энергии возможны три сценария реакции магнитосферы.

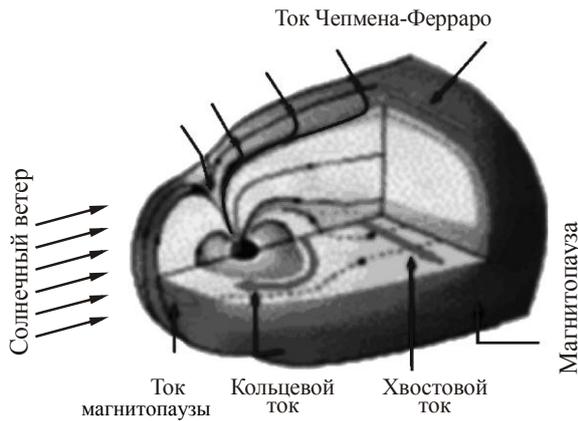


Рис. 7. Структура магнитосферы Земли. Солнечный ветер «сжимает» геомагнитное поле с подсолнечной стороны. Там, где давления уравниваются, образуется магнитопауза, по которой течет ток Чепмена-Ферраро. Показаны также хвостовой и кольцевой токи

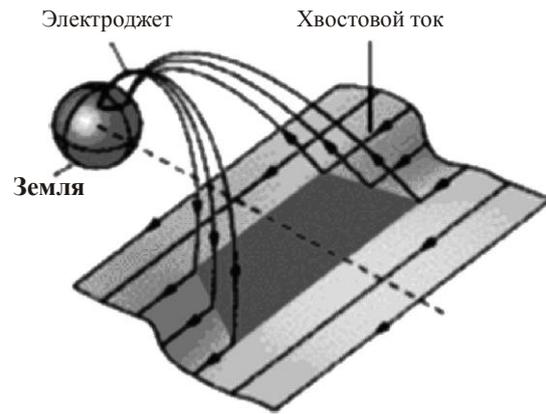


Рис. 8. Схема образования электроджета во время магнитной суббури, при которой электрический ток начинает течь через ионосферу Земли

1. Когда скорость поступления энергии меньше или равна скорости стационарной диссипации энергии внутри магнитосферы, она не изменяет своей формы – в магнитосфере не наблюдается каких-либо существенных изменений, т.е. она остается невозмущенной.

2. В случае, когда скорость поступления энергии превышает скорость стационарной диссипации, часть энергии уходит из магнитосферы по «квазистационарному каналу», что приводит к восстановлению ее состояния. Роль такого канала играют *магнитные суббури* – процессы высвобождения магнитной энергии, накопленной в магнитосфере, путем замыкания хвостового тока (рис. 7) вдоль магнитных линий через ионосферу в области ночной части полярного овала. Вновь образуемый ток называется «электроджет» (рис. 8). Наиболее впечатляющее проявление суббурь – *полярное сияние*, возникающее в результате бомбардировки нейтральных атомов атмосферы потоками плазмы хвоста магнитосферы, ускоренной вдоль магнитных силовых линий. Магнитосфера может долгое время сбрасывать излишки энергии в полярные области обоих полушарий Земли в виде суббурь с периодичностью около 3 ч.

3. Когда скорость поступления энергии существенно превышает скорость стационарной и квазистационарной диссипации, происходит глобальная перестройка токовой системы магнитосферы и ионосферы, сопровождаемая сильными возмущениями магнитного поля на Земле, что по существу и называется магнитной бурей. Основным вклад в изменение магнитного поля вносит *кольцевой ток*, расположенный в области геомагнитного экватора (рис. 7). Поэтому в отличие от магнитных суббурь, при которых возмущения магнитного поля наблюдаются в полярных областях, во время магнитных бурь поле изменяется и на низких широтах вблизи экватора. При сильных бурях полярные сияния могут опускаться на 20–30° к экватору от полярных областей и наблюдаться на низких широтах, как это происходило, например, 30 октября 2003 г.

Таким образом, магнитосферные возмущения возникают в результате резких изменений в существующих токовых системах в магнитосфере и ионосфере Земли или образования новых токовых систем. Важно отметить, что изменение кольцевого тока во время бури значительно больше электроджета, возникающего при суббурях. Однако из-за того, что кольцевой ток расположен далеко от поверхности Земли в отличие от элек-

троджета, который практически достигает нижних слоев ионосферы и атмосферы, изменения магнитного поля на Земле во время магнитных бурь носят глобальный характер (исключением являются небольшие области вблизи магнитных полюсов) и составляют в максимуме не более 500 нТ. Изменение же магнитного поля во время суббури носит локальный характер и может составлять $1-3 \cdot 10^3$ нТ. (Надо помнить, что постоянное поле Земли составляет около $30-50 \cdot 10^3$ нТ, т.е. в любом случае речь идет об изменениях, не превышающих несколько процентов, что значительно меньше полей техногенного происхождения).

Состояние магнитосферы описывается рядом различных индексов, рассчитываемых на основании наземных измерений магнитного поля [Mayaud, 1980]. Так как для конструирования этих индексов используются показания различных сетей магнитных станций, то в них оказываются включенными отклики различных магнитосферно-ионосферных токовых систем. Положение двух систем наземных станций, данные которых используются для вычисления D_{st} - и K_p -индексов, наиболее часто применяющихся для описания магнитных бурь, показаны на рис. 9.

С одной стороны, можно предположить, что при достаточной статистике магнитных бурь должна существовать корреляция между экстремальными значениями различных индексов. Такой анализ был выполнен для 1085 магнитных бурь в период 1957–1993 гг. [Loewe, Prolss, 1997], его результаты представлены в табл. 2. С другой стороны, подобные результаты могут привести к иллюзии, что магнитосферные индексы взаимозаменяемы. Однако уже первые попытки анализа реальных данных демонстрируют неидентичность поведения различных индексов во время одного и того же события. Например, в интервале времени 15–23 UT 24 октября 2003 г. [Веселовский и др., 2004] при отмечаемых высоких значениях K_p -индекса D_{st} -индекс оставался на обычном уровне.

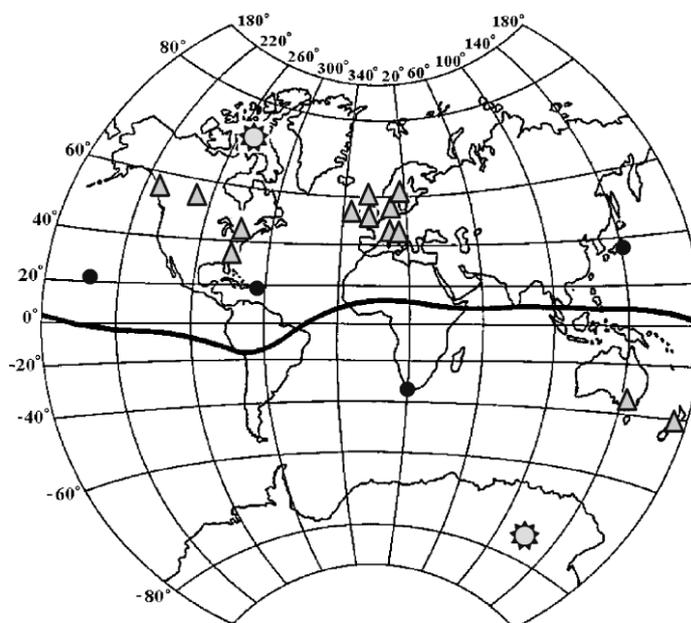


Рис. 9. Схема размещения двух систем наземных станций, данные которых используются для определения индексов D_{st} (кружки) и K_p (треугольники). Звездочками отмечено местоположение магнитных полюсов; утолщенная линия – геомагнитный экватор

Таблица 2. Классификация магнитных бурь на основе D_{st} -индекса, измеренного в 1957–1993 гг. [Loewe, Prolss, 1997]

Класс бури	Кол-во бурь	Процент	D_{st} , нТ	$\langle D_{st} \rangle$	$\langle ap \rangle$	$\langle K_p \rangle$	$\langle AE \rangle$, нТ
Слабые (Weak)	482	44	-30... -50	-36	27	4 _o	542
Умеренные (Moderate)	346	32	-50...-100	-68	48	5 _o	728
Сильные (Strong)	206	19	-100...-200	-131	111	7 ₋	849
Экстремальные (Severe)	45	4	-200...-350	-254	236	8 ₊	1017
Выдающиеся (Great)	6	1	< -350	-427	300	9 ₋	1335

Зависимость экстремальных значений K_p -индекса от экстремальной величины D_{st} -индекса для 611 магнитных бурь ($-300 < D_{st} < -60$ нТ) в период 1976–2000 гг. представлена на рис. 10 [Ермолаев, Ермолаев, 2003б]. Большой разброс данных объясняется тем, что K_p - и D_{st} -индексы измеряются на разных геомагнитных широтах и чувствительны к разным токовым системам (магнитосферным явлениям): авроральному электроджету (магнитным суббурям) и кольцевому току (магнитным бурям). Таким образом, для того, чтобы изучать связь магнитных бурь с различными явлениями и исключить из анализа авроральные явления, необходимо использовать D_{st} -индекс. В случае проведения исследований влияния аврорального электроджета на различные системы лучше использовать специальный AE -индекс. K_p -индекс чувствителен к обоим явлениям и не позволяет исследовать отдельно влияние каждой токовой системы.

Для корректного использования индексов геомагнитной активности в приложении к смежным дисциплинам, включая гелиобиофизику, необходимо иметь общие представления о принципах построения и физическом смысле геомагнитных индексов, их взаимозависимости и интервалах их значений, которые соответствуют различным уровням геомагнитной активности. Знакомство с данными, представленными в настоящей статье (рис. 7 – 10, табл. 2), будет способствовать прояснению некоторых из этих проблем. Более подробная информация может быть найдена в [Mayaud, 1980; Loewe, Prolss, 1997].

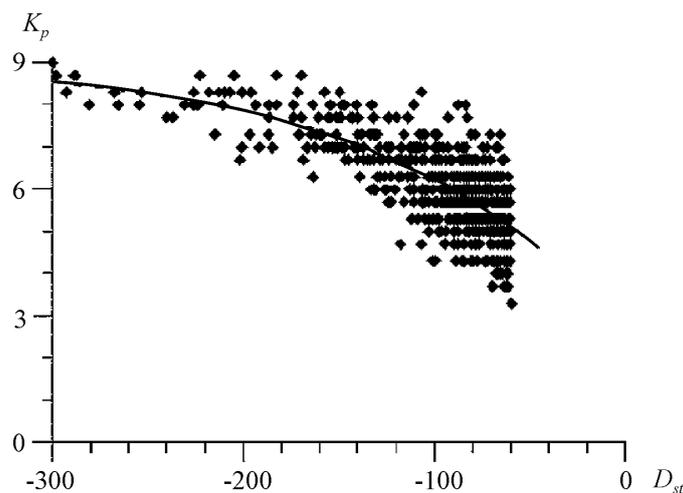


Рис. 10. Соотношение экстремальных значений индексов K_p и D_{st} для 611 магнитных бурь с $-300 < D_{st} < -60$ нТ в период 1976–2000 гг. Сплошная линия – аппроксимация представленных данных [Ермолаев, Ермолаев, 2003б]

5. Корреляции между различными событиями «Космической погоды»

Достаточно обычной в солнечно-земной физике является ситуация, когда отсутствует строгое доказательство наличия причинно-следственных связей между исследуемыми явлениями. Единственным экспериментальным фактом является то, что одно событие наблюдалось после другого в течение некоторого заранее выбранного временного окна. Как правило, любая дополнительная информация о явлениях не является прямой при изучении соотношения между ними. В качестве примера рассмотрим связь «вспышка – магнитная буря» (рис. 11). В этом случае величины окон определяются средней скоростью движения возмущений от Солнца до Земли (соответствующая шкала средней скорости показана внизу на рис. 11,А). Окна a, b, c, d соответствуют интервалам, для которых предполагается, что связь «вспышка-буря» имеет, соответственно, высокую, среднюю, низкую и нулевую вероятность. На рис. 11,Б показана вероятность возбуждения бури после вспышки на западном и восточном полушарии Солнца. Полная вероятность генерации бури солнечными вспышками оценивается около 40 % [Ермолаев, Ермолаев, 2003а]. Во многих исследованиях используются только два уровня вероятности (события связаны и не связаны), при этом упускается тот факт, что связь между событиями носит вероятностный характер.

Выше были кратко описаны методы идентификации и классификации солнечных (СМЕ и солнечные вспышки), межпланетных (CIR, Sheath, MC, Ejecta и др.) и геомагнитосферных (магнитные бури) явлений. Помимо неоднозначности, связанной с различными подходами к классификации явлений, существует неоднозначность, связанная с различными методами их сравнения в двух областях пространства. Если для анализа были выбраны два явления с наборами X_1 и X_2 и соответствия между этими явлениями установлены для числа явлений X_{12} , то вероятность процесса $X_1 \rightarrow X_2$ обычно определяется как отношение величин X_{12}/X_1 , которое отличается от вероятности $X_2 \rightarrow X_1$, равной $X_{21}/X_2 = X_{12}/X_2$. Величины X_1 и X_2 относятся к разным явлениям, получены по разным критериям и могут иметь разное значение (например, как это видно на рис. 3, число солнечных вспышек класса M и выше приблизительно на порядок больше, чем

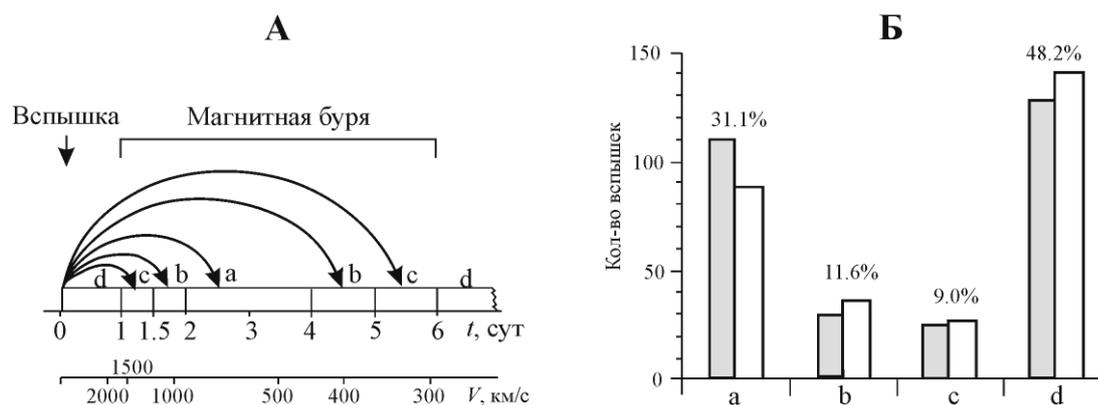


Рис. 11. А: схема установления соответствия между вспышками и бурями для различных временных окон a, b, c, d (длительность окон указана в сутках на горизонтальной линейке; шкала под ней – средняя скорость движения возмущений от Солнца к Земле в км/с). Б: количество западных (залитый столбик) и восточных (столбик без заливки) сильных солнечных вспышек, приводящих к бурям с высокой (а), средней (b), низкой (c) вероятностью и не приводящих к ним (d). В процентах обозначена их доля от общего числа вспышек, попадающих в соответствующее окно. [Ермолаев, Ермолаев, 2003а]

число средних и сильных магнитных бурь). Таким образом, «геоэффективность», определенная в различных исследованиях, зависит от направления анализа процесса. Если принять во внимание, что в некоторых исследованиях набор X_2 не фиксируется заранее (до начала анализа), т.е. правила (или критерии) выбора явлений для набора X_2 первоначально не установлены, а подбираются в процессе исследования, неоднозначность вычисления «геоэффективности» может дополнительно увеличиться.

Так как при анализе данной цепочки солнечно-земной физики исследуется двухступенчатый процесс – Солнце–солнечный ветер и солнечный ветер–магнитосфера, – информация о межпланетной среде позволяет увеличить надежность оценки всей цепочки. Предположим, что есть наборы данных на Солнце (X_1 и Y_1), в межпланетной среде (Y_2 и Z_1) и магнитосфере (X_2 и Z_2), для которых получены оценки вероятности процессов $X_1 \rightarrow X_2$ (X_{12}/X_1), $Y_1 \rightarrow Y_2$ (Y_{12}/Y_1) и $Z_1 \rightarrow Z_2$ (Z_{12}/Z_1). В этом случае естественно предположить, что вероятность полного процесса должна быть близкой к произведению вероятностей отдельных этапов, т.е. $X_{12}/X_1 = (Y_{12}/Y_1)(Z_{12}/Z_1)$. В частности, это означает, что «геоэффективность» (в значении «вероятность») полного процесса не может быть выше «геоэффективности» каждой из частей $X_{12}/X_1 \leq Y_{12}/Y_1$, $X_{12}/X_1 \leq Z_{12}/Z_1$. Например, «геоэффективность» солнечных событий не может превышать «геоэффективность» межпланетных событий. Опубликованные данные содержат достаточно материала, чтобы выполнить такой анализ; ниже будут продемонстрированы его результаты.

Важно отметить, что многие авторы часто называют «геоэффективностью» явлений величины, полученные с помощью абсолютно других процедур. Как уже отмечалось выше, в строгом смысле слова «геоэффективность» (как вероятность) солнечных и межпланетных явлений является долей (процентом) соответствующих наборов солнечных и межпланетных явлений, которые привели к магнитной буре, причем к буре определенной силы.

Наиболее распространенной ошибкой является то, что некоторые авторы используют метод обратной трассировки событий: первоначально они берут список магнитных бурь и затем экстраполируют их обратно в межпланетную среду или на Солнце, чтобы найти подходящие явления. Это важный метод, так как он позволяет найти явления (кандидатов), которые могут быть рассмотрены в качестве причины исследуемых магнитных бурь в межпланетном пространстве и на Солнце. Однако этот метод не позволяет определить «геоэффективность» (вероятность) этих явлений. В качестве кандидатов часто рассматриваются явления различных классов (лишь бы они попадали в анализируемое временное окно), что является одной из основных причин расхождения результатов многих работ.

Изучение связи «вспышка – магнитная буря» и, вообще, связи событий на Солнце и в межпланетном пространстве, как уже отмечалось во Введении, весьма важно для гелиобиофизики, так как на его основе осуществляются прогнозы геомагнитных возмущений на Земле. Оно дает необходимую информацию для разработки профилактических мер, а порой и мер по спасению от летальных исходов больных с патологией сердечно-сосудистой системы, находящихся в отделениях реанимации [Гурфинкель, 2004]. Уточнение прогноза геомагнитных возмущений по наблюдениям за Солнцем, представленное в следующем разделе статьи, имеет для гелиобиофизики принципиальное значение.

6. Результаты и обсуждение

С учетом вышесказанного проведен анализ опубликованных разными авторами данных и получены результаты по геоэффективности солнечных и межпланетных явлений с позиций двух разных толкований понятия «геоэффективность» – как вероятность возбуждения магнитных бурь и как эффективность процесса генерации магнитных бурь. Эти результаты обсуждаются раздельно в двух нижеследующих подразделах.

6.1. Геоэффективность (вероятность) различных явлений

Была проведена селекция опубликованных результатов по «геоэффективности» *CME*, солнечных вспышек и межпланетных явлений с учетом того, как авторы проводили трассировку событий (прямая или обратная трассировка) и какие пары явлений анализировали: «*CME* → *Storm*», «*CME* → *MC, Ejecta*», «*MC, Ejecta* → *Storm*», «*Storm* → *MC, Ejecta*», «*MC, Ejecta* → *CME*», «*Storm* → *CME*», «*Flare* → *Storm*» и «*Storm* → *Flare*». Результаты этой селекции представлены в табл. 3 и схематически изображены на рис. 12. От предыдущих публикаций [Ермолаев, Ермолаев, 2003б; Yermolaev et al., 2005а, Yermolaev, Yermolaev, 2006] таблицу отличает внесение в нее ряда статей последних лет и внесение дополнительного процесса «*CIR* → *Storm*» [Alves et al., 2006]. Запись в таблице «*CME* → *Storm*» означает, что в качестве начального набора данных взят список *CME*, число анализируемых случаев которого представлено в колонке 3 таблицы. *CME* сопоставляются с магнитными бурями, величина которых определяется

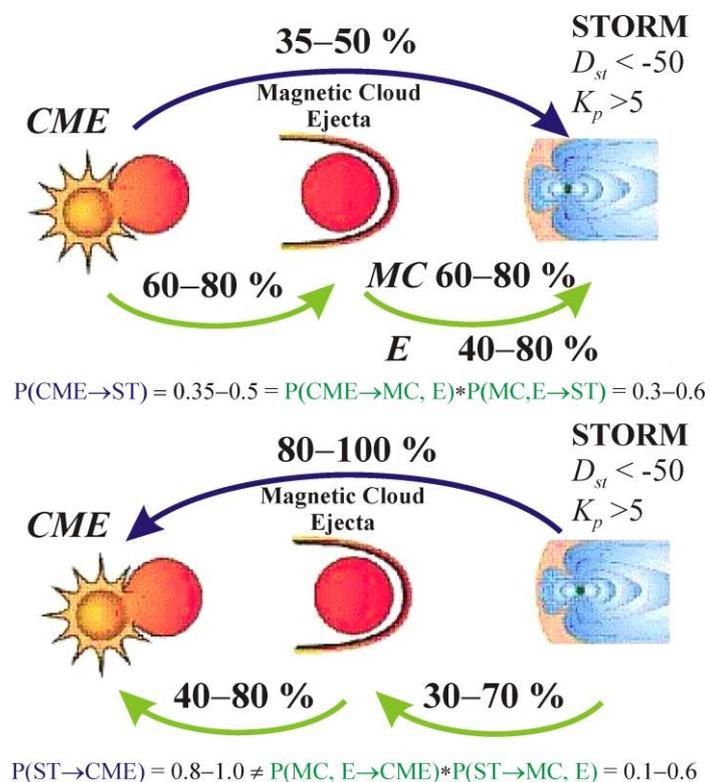


Рис. 12. Схематическое представление корреляции между *CME*, *MC/Ejecta* и магнитными бурями для прямой (вверху) и обратной (внизу) трассировки явлений. Численные значения корреляции приведены около соответствующих стрелок. Соотношения вероятностей для одно- и двухшаговой трассировки показаны под каждым из фрагментов [Yermolaev et al., 2005а; Yermolaev, Yermolaev, 2006]

Таблица 3. Корреляция между солнечными, межпланетными и магнитосферными явлениями

N	%	Число случаев	Значения индексов, комментарии	Источники данных
1	2	3	4	5
I: CME → Storm				
1	50	38	K_p	Webb et al., 1996
2	71	7	$D_{st} < -50$	Webb et al., 2000; Crooker, 2000; Li et al., 2001
3	35	40	$K_p > 6$	Plunkett et al., 2001
4	45	20	$K_p > 5$	Berdichevsky et al., 2002
5	35–92	?	$D_{st} < -50$	Webb, 2002
6	45	132 ^a	$K_p > 5$	Wang et al., 2002
	20	132 ^a	$K_p > 7$	
7	35	125 ^a	$D_{st} < -60$	Ермолаев, Ермолаев, 2003а
	40	125 ^a	$D_{st} < -50$	Ермолаев, Ермолаев, 2003б
8	64	70 ^b	$D_{st} < -50$	Zhao, Webb, 2003
	71	49 ^c	$D_{st} < -50$	
9	58	12 ^c	$D_{st} < -50$	Moon et al., 2005
10	42	218 ^a	$D_{st} < -50$	Yermolaev, Yermolaev, 2006
11	40	305 ^b	$D_{st} < -50$	Kim et al., JGR, 2005
12	71	229 ^b	$D_{st} < -50$	Gopalswamy et al., 2007
^a – Направленные к Земле гало-CME, ^b – гало-CME на лицевой стороне Солнца, ^c – гало-CME в центре лицевой стороны Солнца				
II: CME → Magnetic Clouds, Ejecta				
1	63	8	Гало-CME к Земле	Cane et al., 1998
2	60–70	89	Гало-CME к Земле	Webb et al., 2001
3	80	20	Гало-CME	Berdichevsky et al., 2002
4	50–84	181	Все CME	Schwenn et al., 2005
	53–90	154	Все CME к Земле	
	59–93	91	Полное гало-CME к Земле	
III: Magnetic Clouds, Ejecta → Storm				
1	44	327 E	$K_p > 5_-$	Gosling et al., 1991
2		28 MC		Gopalswamy et al., 2000
	67		$D_{st} < -60$	Ермолаев, Ермолаев, 2002
3	63	30 MC	$D_{st} < -60$	Ермолаев и др., 2000
4		48 MC		Gopalswamy et al., 2001
	57		$D_{st} < -60$	Ермолаев, Ермолаев, 2003б
5	19	1273 E	$K_p < 5_-$; Solar minimum	Richardson et al., 2001
	63	1188 E	$K_p < 5_-$; Solar maximum	
6	82	34 MC	$D_{st} < -50$	Wu, Lepping, 2002a
7	73	135MC	$D_{st} < -50$	Wu, Lepping, 2002b
8	50	214 E	$D_{st} < -50$	Cane, Richardson, 2003
	43	214 E	$D_{st} < -60$	
9	76	104MC+E	$D_{st}^* < -30$	Zhang et al., 2004
	56	104MC+E	$D_{st}^* < -50$	
	34	104MC+E	$D_{st}^* < -100$	
10	77	149MC	$D_{st} < -50$	Echer, Gonzalez, 2004; Echer et al., 2005
IV: Storm → CME				
1	100	8	$K_p > 6$	Brueckner et al., 1998
2	83	18	$K_p > 6$	St.Cyr et al., 2000; Li et al., 2001
3	94	?	?	Srivastava, 2002
4	96	27	$D_{st} \leq -100$	Zhang et al., 2003
5	83	23	$D_{st} \leq -100$	Watari et al., 2004
6	100	10	$-100 < D_{st} < -200$	Srivastava, Venkatakrishnan, 2004
	83	54	$D_{st} < -100$	

1	2	3	4	5
V: Storm → Magnetic clouds, Ejecta				
1	73	37	$K_p > 7_-$	<i>Gosling et al., 1991</i>
2	67	12	$D_{st} < -50$	<i>Webb et al., 2000</i>
3	25		$D_{st}(\text{corr})$	<i>Vennerstroem, 2001</i>
4	19	1273 E	$K_p > 5_-, \text{Solar minimum}$	<i>Richardson et al., 2001(GRL)</i>
	12	833	$5_+ > K_p > 5_-$	
	22	352	$6_+ > K_p > 6_-$	
	45	62	$7_+ > K_p > 7_-$	
	88	26	$K_p > 8_-$	
	63	1188 E	$K_p > 5_-, \text{Solar maximum}$	
	50	670	$5_+ > K_p > 5_-$	
	70	341	$6_+ > K_p > 6_-$	
	92	99	$7_+ > K_p > 7_-$	
	100	78	$K_p > 8_-$	
5	33	618	$D_{st} \leq -60$	<i>Ермолаев, Ермолаев, 2002</i>
	25	414	$-100 \leq D_{st} \leq -60$	
	52	204	$D_{st} \leq -100$	
6	32	90	$-100 < D_{st} \leq -50$	<i>Huttunen et al., 2002</i>
	21	100	$7_+ > K_p > 5$	
	76	21	$-200 \leq D_{st} \leq -100$	
	38	21	$7_+ > K_p > 8$	
7	70	30	$D_{st} \leq -100$	<i>Watari et al., 2004</i>
8	24	150	$D_{st} \leq -50, 1978-1982$	<i>Li, Luhmann, 2004</i>
	31	58	$D_{st} \leq -100$	
	70	10	$D_{st} \leq -200$	
	32	187	$D_{st} \leq -50, 1995-2002$	
	46	63	$D_{st} \leq -100$	
	75	8	$D_{st} \leq -200$	
9	29	271	$D_{st}^* < -30$	<i>Zhang et al., 2004</i>
VI: Magnetic clouds, Ejecta → CME				
1	67	49E	Любые CME	<i>Lindsay et al., 1999</i>
2	65	86E	Любые CME	<i>Cane et al., 2000</i>
	42	86E	Гало-CME к Земле	
3	82	28MC	Любые CME	<i>Gopalswamy et al., 2000</i>
4	50-75	4 MC	Гало-CME	<i>Burlaga et al., 2001</i>
	40-60	5 E	Гало-CME	
5	56	193 E	Любые CME	<i>Cane and Richardson, 2003</i>
6	48	21MC	Гало-CME	<i>Vilmer et al., 2003</i>
VII: Flare → Storm				
1	44	126	$> M0 + \text{SEP (Solar Energetic Particles)}$	<i>Ермолаев, Ермолаев, 2002</i>
2	40	653	$> M5$	<i>Ермолаев, Ермолаев, 2003а</i>
3	33	571	> 3 (оптика)	<i>Иванов, Милецкий, 2003</i>
4	44	746	$> M5$	<i>Yermolaev, Yermolaev, 2006</i>
VIII: Flare → SSC				
1	35-45	4836	$> M0$	<i>Park et al., 2002</i>
IX: Storm → Flare				
1	59	116	$K_p > 7_-$	<i>Krajcovic, Krivsky, 1982</i>
2	88	25	$D_{st} \leq -250$	<i>Cliver, Crooker, 1993</i>
3	20	204	$D_{st} \leq -100$	<i>Ермолаев, Ермолаев, 2003а</i>
X: CIR → Storm				
1	33	727	$D_{st} \leq -50$	<i>Alves et al., 2006</i>

индексом, представленным в колонке 4. Таким образом, опубликованные данные были объединены в шести (I – VI) типах сравнения явлений – 3 области пространства и 2 направления трассировки (таблица 3). В группах II, III, IV и V объединены магнитные облака и *Ejecta* (включая *Sheath* и тело *MC/Ejecta*), которые близки по происхождению и своим физическим характеристикам, но в колонке «Число случаев» мы указали авторскую идентификацию символами *MC* (*Magnetic Clouds*) и *E* (*Ejecta*). Таблица также включает данные по следующим группам сопоставления явлений: VII: *Flare* → *Storm*; VIII: *Flare* → *SSC*, IX: *Storm* → *Flare* и X: *CIR* → *Storm*.

Анализ публикаций по процессу «*CME* → *Storm*» позволяет сделать вывод, что «геоэффективность» направленных к Земле гало-*CME* для магнитных бурь с $K_p > 5$ ($D_{st} < -50$ нТ) составляет 40–50% при достаточно высокой статистике (от 38 до 305 *CME*), и величины, полученные в [Webb, 2002; Zhao and Webb, 2003; Gopalswamy et al., 2007] оказываются переоцененными (см. ниже). Результаты анализа для обратной трассировки IV: *Storm* → *CME* находятся в хорошем соответствии между собой (83–100%), но они отражают не высокую «геоэффективность» *CME* – они демонстрируют, что можно легко найти возможного кандидата на источник бури среди *CME* на Солнце (это не удивительно, так как частота наблюдения *CME* в несколько раз выше частоты регистрации магнитных бурь).

Анализ последовательности двухшаговой прямой трассировки II: (*CME* → *Magnetic Clouds*, *Ejecta*) и III: (*Magnetic Clouds*, *Ejecta* → *Storm*) позволяет оценить вероятность для полного процесса *CME* → *Storm*, как произведение вероятностей, и для магнитных облаков мы получаем величину $(0.60 \dots 0.70) \cdot (0.57 \dots 0.82) = 0.34 \dots 0.57$, которая близка к упомянутому выше результату (40–50%) для одношагового процесса I: (*CME* → *Storm*) и ниже, чем оценки, полученные в [Zhao and Webb, 2003; Gopalswamy et al., 2007]. Для *Ejecta* этот подход приводит к меньшей величине. Анализ двухшаговой обратной трассировки V: (*Storm* → *Magnetic Clouds*; *Ejecta*) и VI: (*Magnetic Clouds*; *Ejecta* → *CME*) не позволяет получить высокую величину 83–100% для полного процесса *Storm* → *CME*, так как в этом случае произведение вероятностей дает IV : $(0.25 \dots 0.73) \cdot (0.42 \dots 0.82) = 0.11 \dots 0.60$. Таким образом, результаты сравнения одно- и двухшагового процессов для прямой трассировки *CME* → *Storm* находятся в хорошем согласии, в то время как для обратной трассировки двухшаговой процесс меньше в несколько раз по сравнению с одношаговым. Это означает, что величины для процессов (*Storm* → *Magnetic Clouds*; *Ejecta*), (*Magnetic Clouds*; *Ejecta* → *CME*) и (*Storm* → *CME*) не являются «геоэффективностью» (вероятностью) процессов, описывающих последовательность «причина → следствие».

Хотя «эффективность» (вероятность) генерации бурь в [Webb et al., 2000; Webb, 2002; Zhao, Webb, 2003; Gopalswamy et al., 2007] относится к прямой трассировке I: (*CME* → *Storm*) и ниже, чем при обратной трассировке IV: (*Storm* → *CME*), результаты, полученные в указанных работах, во-первых, превышает оценки других работ для этого процесса, во-вторых, превышают величины, полученные для второго шага, т.е. для процесса III (за исключением работ [Wu, Lepping, 2002a,b; Echer, Gonzalez, 2004; Echer et al., 2005]), в-третьих, близки к величине, полученной для первого шага, т.е. процесса II, и, в-четвертых, превышают оценки, полученные для двухшагового процесса II: $III = (0.6 \dots 0.8) \cdot (0.2 \dots 0.8) = 0.1 \dots 0.6$. Таким образом, оценки «геоэффективности», полученные в [Webb et al., 2000; Webb, 2002; Zhao, Webb, 2003; Gopalswamy et al., 2007], по-видимому, являются завышенными. Как отмечалось выше (раздел 2), существует опасность, что некоторые направленные к Земле *CME* могли быть необоснованно отнесены к *CME* на обратной стороне Солнца [Zhang et al., 2003], и, возможно, эта методи-

ческая ошибка была допущена при анализе данных в ряде отдельных работ [Ермолаев, 2008].

В своих недавних исследованиях [Ермолаев, Ермолаев, 2002, 2003а] авторы выполнили прямую трассировку событий *Flare* → *Storm* и оценили «геоэффективность» (вероятность) 653 сильных солнечных вспышек рентгеновского класса выше *M5* и 126 менее сильных солнечных вспышек рентгеновского класса выше *M0*, но сопровождавшихся возрастанием потока энергичных частиц около Земли. Для магнитных бурь с $D_{st} < -60$ нТ «геоэффективность» (вероятность) составила 40% в первом случае и 44% во втором. Если выполнить обратную трассировку *Storm* → *Flare* и взять список сильных магнитных бурь с $D_{st} < -100$ нТ, среди указанных вспышек только 20% могут быть источниками таких бурь. Аналогичные исследования выполнялись и раньше. Например, в работе [Krajcovic and Krivsky, 1982] анализировалась обратная трассировка *Storm* → *Flare* для больших солнечных вспышек оптического класса и было показано, что в период 1954–1976 гг. для 116 бурь с $K_p > 7$ обнаружено 59 % возможных источников. В работе [Cliver, Crooker, 1993] обратная трассировка *Storm* → *Flare* показала, что для 25 сильнейших магнитных бурь ($D_{st} < -250$ нТ) в период 1957–1990 гг. по крайней мере в 22 случаях (88 %) были обнаружены вспышки, которые можно рассматривать как кандидаты в источники бурь. Высокие значения «геоэффективности» (вероятности), обнаруженные в работах [Krajcovic, Krivsky, 1982; Cliver, Crooker, 1993], кроме обратной трассировки явлений могут быть связаны с тем фактом, что в этих работах в качестве возможных кандидатов источников бурь рассматривались даже слабые вспышки (см. соотношение частоты вспышек и бурь на рис. 3), в то время как в нашем анализе использовались только сильные вспышки.

Сравнение событий *Flare* → *SSC* (т.е. не с самими магнитными бурями, а с их предвестниками – *Storm Sudden Commencements* – *SSC*), которые часто наблюдаются за несколько десятков минут до начала фазы роста магнитной бури, было выполнено в работе [Park et al., 2002] для 4836 вспышек класса выше *M1* для 1975–1999 гг. Результаты показали, что оценка «геоэффективности» (вероятности) для временного запаздывания («окна» ожидания) 2–3 сут. составляет 35–45 %, а для более продолжительного «окна» – 50–55%. Этот результат близок к «геоэффективности» *Flare* → *Storm*, обсуждаемой выше, хотя и был получен не для бурь, а для *SSC*.

Чтобы оценить полученные вероятности с точки зрения их практической применимости, сравним вероятность генерации магнитных бурь солнечными событиями с вероятностью случайных событий. Взяв для этой цели величину «окна ожидания» и средний период между бурями в возмущенные годы, получим величину 35% [Ермолаев, Ермолаев, 2003б]. Это означает, что на сегодняшний день вероятность предсказания магнитных бурь на основании солнечных данных лишь немного превышает вероятность прогноза на основе случайности.

Таким образом, надежность прогноза магнитных бурь по межпланетным явлениям и непосредственным измерениям параметров солнечного ветра (см. например, сайт <http://www.iki.rssi.ru/sw.htm>) достаточно высока (60–80 % и 90–95 %, соответственно). Кроме того, параметры солнечного ветра и ММП позволяют рассчитать величину возмущения в магнитосфере. Надежность прогноза по солнечным явлениям низка, о величине предсказываемой магнитной бури можно судить по классу солнечной вспышки только после того, как зарегистрирован ассоциированный с ней *СМЕ*,двигающийся в сторону Земли (т.е. гало-*СМЕ*). Например, близкие алгоритмы предсказания магнитных бурь на основе наблюдений солнечных вспышек и *СМЕ* (или связанных с *СМЕ* предше-

ствующей ему ударной волной и радиовсплесков IV и II типа, соответственно) предлагаются в литературе [Song *et al.*, 2006; Valach *et al.*, 2007].

Прогноз, сделанный без данных о *CME*, носит по существу случайный характер и не может иметь практической ценности. Повышение качества подобного прогноза должно идти по двум направлениям: (1) введение в рассмотрение количественного описания взаимосвязей между параметрами вспышки и *CME*, (2) повышение вероятности прогноза взаимодействия *CME* с магнитосферой Земли.

6.2. Эффективность генерации бурь различными явлениями

Как уже отмечалось выше, магнитные бури в основном могут генерироваться следующими типами солнечного ветра: *ICME*, включая *Sheath* и тело *ICME* (*MC/Ejecta*), и *CIR* [Vieira *et al.*, 2004; Huttunen, Koskinen, 2004; Yermolaev *et al.*, 2005b; Yermolaev, Yermolaev, 2006]. В [Ермолаев и Ермолаев, 2002] показано, что временные изменения доли бурь, индуцированных *CIR* и *ICME*, имеют по два максимума (минимума) за солнечный цикл и изменяются в противофазе. С другой стороны, существуют экспериментальные свидетельства, различий между бурями, генерированными *Sheath*, *MC* и *CIR* [Borovsky, Denton, 2006; Denton *et al.*, 2006; Pulkkinen *et al.*, 2007b). В некоторых работах представлены соотношения между экстремальными значениями («Peak-to-peak»-анализ) $B_z - D_{st}$ и $E_y - D_{st}$ ($E_y = V_x \cdot B_z$ – электрическое поле солнечного ветра во время южной B_z -компоненты ММП) раздельно для бурь, индуцированных *CIR*, и бурь, индуцированных *MC*. При совместном рассмотрении этих данных (рис. 13, 14) можно видеть, что на фоне значительного разброса экспериментальных точек существенные различия зависимостей для разных источников бурь отсутствуют. Эти результаты получены без селекции *Sheath* и *MC*, а так как условия в *Sheath* и *CIR* близки друг к другу (оба типа образуются в результате сжатия и деформации медленного и быстрого потоков), то использованный подход может маскировать различия рассматриваемых зависимостей. Авторы проверили такую возможность, рассчитав зависимости $B_z - D_{st}$ и $E_y - D_{st}$ раздельно для *CIR*, *Sheath* и *MC*, но на фоне большого разброса данных также не обнаружили существенных различий [Ермолаев и др., 2007б]. Поэтому различия бурь, индуцированных *CIR*, *Sheath* и *MC*, могут быть связаны не с величиной пиков B_z и E_y , а с другими параметрами плазмы и поля солнечного ветра, а также с их динамикой.

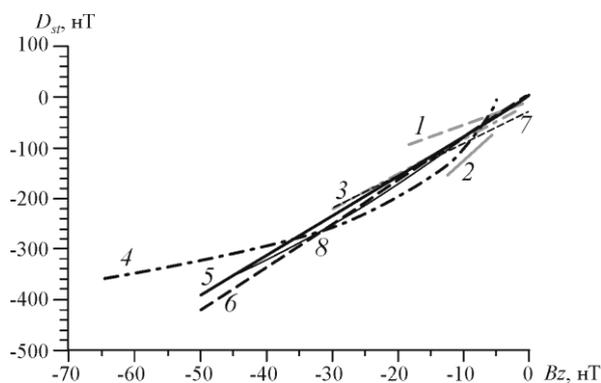


Рис. 13. Корреляционная зависимость между индексом D_{st} и B_z -компонентой для различных типов солнечного ветра по данным разных исследователей. *CIR*: 1 – [Alves *et al.*, 2006]; 2 – [Richardson, Cane, 2005]; 3 – [Ермолаев и др., 2007б]; *Sheath* + *MC*: 4 – [Naitamor, 2005]; 5 – [Wu, Lepping, 2002b, 2005]; 6 – [Richardson, Cane, 2005]; 7 – [Ермолаев и др., 2007б]; 8 – [Yurchyshyn *et al.*, 2004]

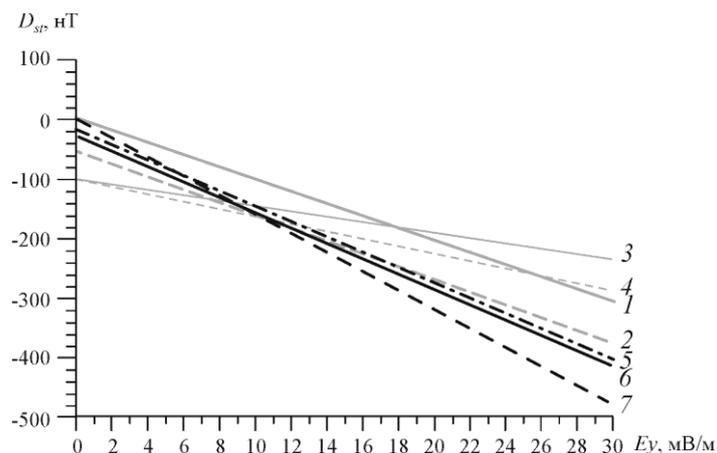


Рис. 14. Корреляционная зависимость между индексом D_{st} и E_y -компонентой для различных типов солнечного ветра по данным разных исследователей. CIR: 1 – [Alves et al., 2006], 2 – [Ермолаев и др., 2007б]; Sheath + MC: 3 – [Srivastava, Venkatakrishnan, 2004], 4 – [Kane, 2005], 5 – [Wu, Lepping, 2005], 6 – [Ермолаев и др., 2007б], 7 – [Wu, Lepping, 2002b]

Для 623 магнитных бурь с $D_{st} < -60$ нТ, отмеченных в период 1976–2000 гг., на основании базы данных OMNI (с рассчитанными и добавленными в базу дополнительными физическими параметрами) авторами был выполнен анализ влияния параметров солнечного ветра и ММП, а также их изменений, отдельно для CIR, Sheath и MC [Ермолаев и др., 2007а,б]. Для анализа использовался метод наложения эпох (за начало «эпохи» бралось время начала бури). Различия во временных профилях параметров солнечного ветра и ММП для CIR (121 буря), Sheath (22 бури) и MC (113 бурь) показаны на рис. 15. Как «Unknown» обозначены 367 бурь, для которых в базе OMNI (около половины полной длительности наблюдений) отсутствовал полный набор данных, что не позволило однозначно идентифицировать типы солнечного ветра. В левом столбце представлены N – плотность, V – скорость, P_{dyn} – динамическое давление, T – температура протонов, T/T_{exp} – отношение измеренной температуры к рассчитанной на основании скорости, D_{st} индекс; в правом, – β – отношение теплового давления к магнитному, B , B_x , B_y и B_z – величина и GSM-компоненты ММП, а также K_p -индекс. Кривые, полученные усреднением для различных типов солнечного ветра, показаны разным цветом. Изменчивость всех параметров для различных типов солнечного ветра достаточно велика, и в некоторых случаях различия между точками усредненных кривых меньше, чем дисперсии соответствующих параметров, что позволяет говорить скорее о некоторой тенденции, чем о доказанном факте. Тем не менее, заметное расхождение кривых на протяжении многих часов измерений дает основание для ряда определенных выводов [Ермолаев и др., 2007а,б].

1. Хотя поведение параметров солнечного ветра во время магнитных бурь существенно различается для разных типов солнечного ветра, B_z -компонента ММП для всех типов ветра за 1–2 ч. до начала магнитной бури поворачивает на юг и через 2–3 ч после начала бури достигает минимума; одновременно происходит увеличение плотности и динамического давления.

2. Хотя более низкие величины B_z -компоненты ММП наблюдается в MC, наименьшее среднее значение D_{st} -индекса достигается в Sheath. Таким образом, процесс гене-

рации бури более эффективен во время *Sheath*, а не во время прихода тела *MC*, возможно благодаря более высокой величине и вариациям давления и магнитного поля.

3. То, что, nkT , T/T_{exp} и β -параметр в *CIR* и *Sheath* имеют более высокие значения, а в *MC* более низкие, согласуется с физической сущностью этих типов потоков солнечного ветра и подтверждает правильность их селекции.

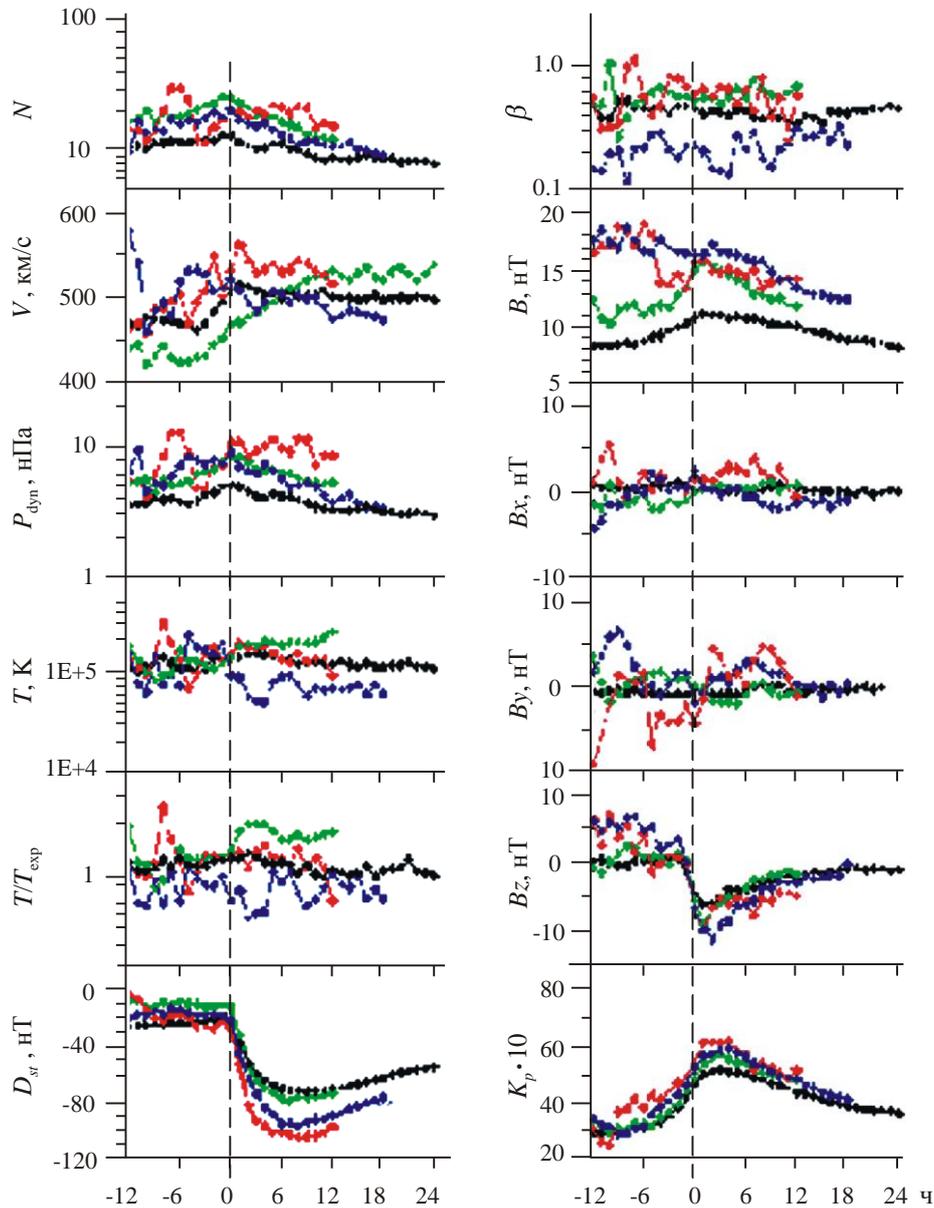


Рис. 15. Поведение параметров плазмы и магнитного поля солнечного ветра для магнитных бурь, генерированных разными типами солнечного ветра в период 1976–2000 гг.: *CIR* (зеленые кривые), *Sheath* (красные), *MC* (синие) и «*Unknown*» (черные) [<http://arxiv.org/abs/physics/0603251>; Yermolaev et al., 2007]. Для анализа данных базы OMNI использован метод наложения эпох с «нулевым» временем, соответствующим первой одночасовой точке резкого падения индекса D_{st} . На горизонтальных осях – время от начала эпохи, ч. Расшифровку параметров левого и правого столбцов см. в тексте

7. Заключение

Сначала кратко повторим основные положения солнечно-земной физики об источниках и причинах магнитных бурь на Земле.

1. Источником магнитных бурь на Земле является большая (> 5 нТ) и продолжительная (более 2 ч) южная ($B_z < 0$) компонента межпланетного магнитного поля (ММП), которая делает магнитосферу «открытой» для поступления в нее энергии солнечного ветра.

2. В стационарном солнечном ветре B_z -компонента мала или отсутствует вовсе; поэтому все магнитные бури связаны с возмущенными типами солнечного ветра.

3. Существуют две цепочки солнечно-земных связей, приводящих к магнитным бурям:

1) выброс корональной массы (*CME*) \rightarrow магнитное облако + область сжатия перед ним (*Sheath*) с $B_z < 0 \rightarrow$ магнитная буря;

2) корональная дыра \rightarrow быстрый солнечный ветер создает область сжатия с $B_z < 0 \rightarrow$ магнитная буря.

4. Только те солнечные вспышки, которые связаны с *CME*, могут рассматриваться как кандидаты на солнечные источники магнитных бурь. Большинство вспышек не имеет никакой причинно-следственной связи с магнитными бурями.

5. При увеличении отрицательной B_z -компоненты или энергии, поступающей в магнитосферу, сначала (при более низких значениях) начинают возбуждаться магнитные суббури (авроральный электроджет), а затем (при более высоких значениях) – магнитные бури (возмущения кольцевого тока) вместе с суббурями. Авроральный электроджет воздействует локально (в ночной части авроральной области), а бури – глобально, в широкой полосе вне авроральных областей.

6. Наиболее точным индикатором магнитной бури на Земля является D_{st} -индекс, индикатором суббури – *AE*-индекс. K_p -индекс чувствителен и к бурям, и к суббурям и не позволяет разделить их влияние.

7. Термин «геоэффективность» имеет два различных значения:

1) *вероятность*, т.е. доля (процент) тех или иных явлений, имеющих причинно-следственные связи с магнитными бурями (в этом случае необходимо использовать методы прямой трассировки от явления к буре, а не наоборот);

2) *эффективность процесса генерации* бури различными явлениями, имеющими причинно-следственные связи с бурями, т.е. сравнение «выхода» процесса с его «входом».

Анализ публикаций по геоэффективности солнечных и межпланетных явлений и результаты, полученные авторами, позволили сделать следующие выводы.

- Оценка геоэффективности зависит от методов идентификации и классификации явлений, а также от методов и направления поиска корреляций между явлениями (обратная трассировка не дает оценок геоэффективности).
- Геоэффективность (вероятность процесса генерации магнитной бури) для *CME* и вспышек составляет 40–60% , что лишь немного превышает вероятность случайных процессов.
- Прогноз геомагнитных бурь на основании солнечных наблюдений может содержать большой процент «ложных тревог».
- Геоэффективность *ICME* (*Sheath* + *MC*) составляет 60–80 %.
- Геоэффективность *CIR* (*Corotating Interaction Region*) составляет 20–35 %.

- Не обнаружено существенных различий в «*peak-to-peak*»-зависимостях $D_{st} - Bz$ и $D_{st} - E_y$ для магнитных бурь, генерированных *MC*, *Sheath* и *CIR*, хотя существуют различия в их развитии.
- Минимальная величина Bz -компоненты ММП наблюдается в *MC*, а минимальное значение D_{st} -индекса – в *Sheath*, т.е. эффективность физического процесса генерации бури во время *Sheath* более высока, чем во время *MC*. Возможно, это объясняется более высоким уровнем вариаций поля и давления в *Sheath*.

8. Благодарности

Авторы выражают глубокую благодарность группам, работающим с SOHO, GOES и другими спутниками, а также на наземных магнитных станциях и развивающим базу данных OMNI, за возможность использования этих данных в выполненных исследованиях.

Работа частично поддержана РФФИ (проект 07-02-00042) и Программой 15 ОФН РАН «Плазменные процессы в солнечной системе».

Литература

- Веселовский И.С., Панасюк М.И., Авдюшин С.И. и др. Солнечные и гелиосферные явления в октябре-ноябре 2003г.: Причины и следствия // Космические исследования. 2004. Т. 42, № 5. С. 453 – 508.
- Гурфинкель Ю.И. Ишемическая болезнь сердца и солнечная активность. Изд-во «Эльф-3». ВИНТИ, 2004. 169 с.
- Ермолаев Ю.И., Комментарий к статье N. Gopalswamy, S. Yashiro, and S. Akiyama «Geoeffectiveness of halo coronal mass ejections» (J. Geophys. Res., 112, A06112, doi:10.1029/2006JA012149) // Космические исследования. 2008. Т.6, № 46. С. 572 – 573. DOI: 10.1134/S0010952508060099.
- Ермолаев Ю.И., Ермолаев М.Ю. О некоторых статистических взаимосвязях солнечных, межпланетных и геомагнитосферных возмущений в период 1976–2000 гг. // Космические исследования. 2002. Т. 40, № 1. С. 3 – 16.
- Ермолаев Ю.И., Ермолаев М.Ю. О некоторых статистических взаимосвязях солнечных, межпланетных и геомагнитосферных возмущений в период 1976–2000 годов. 2. // Космические исследования. 2003а. Т. 41, № 2. С. 115 – 119.
- Ермолаев Ю.И., Ермолаев М.Ю. О некоторых статистических взаимосвязях солнечных, межпланетных и геомагнитосферных возмущений в период 1976–2000 годов. 3. // Космические исследования. 2003б. Т. 41, № 6. С. 573 – 584.
- Ермолаев Ю.И., Застенкер Г.Н., Николаева Н.С. Реакция магнитосферы Земли на события в солнечном ветре по данным проекта ИНТЕРБОЛ // Космические исследования. 2000. Т. 38, № 6. С. 563 – 576.
- Ермолаев Ю.И., Зеленый Л.М., Застенкер Г.Н. и др. Солнечные и гелиосферные возмущения, приведшие к сильной магнитной буре 20 ноября 2003 года // Геомагнетизм и аэрономия. 2005а. Т. 45, № 1. С. 23 – 50.
- Ермолаев Ю.И., Зеленый Л.М., Застенкер Г.Н. и др. Год спустя: Солнечные, гелиосферные и магнитосферные возмущения в ноябре 2004 г. // Геомагнетизм и аэрономия. 2005б. Т. 45, № 6. С. 723 – 763.

- Ермолаев Ю.И., Ермолаев М.Ю., Лодкина И.Г., Николаева Н.С.* Статистическое исследование гелиосферных условий, приводящих к магнитным бурям // *Космические исследования.* 2007а. Т. 45, № 1. С. 3 – 11.
- Ермолаев Ю.И., Ермолаев М.Ю., Лодкина И.Г., Николаева Н.С.* Статистическое исследование гелиосферных условий, приводящих к магнитным бурям. 2. // *Космические исследования.* 2007б. Т. 45, № 6. С. 489 – 498.
- Ермолаев Ю.И., Николаева Н.С., Лодкина И.Г., Ермолаев М.Ю.* Каталог крупномасштабных явлений солнечного ветра для периода 1976–2000 гг. // *Космические исследования.* 2009. Т. 47, № 2. С. 99 – 113.
- Зенченко Т.А., Бреус Т.К.* Существует ли опережающая реакция на магнитную бурю? // *Геофизич. процессы и биосфера.* 2008. Т. 7, № 3. С. 5 – 13.
- Иванов В.Г., Милецкий Е.В.* Пространственно-временные факторы геоэффективности солнечных вспышек // *Сб. трудов конф. «Климатические и экологические аспекты солнечной активности».* СПб., 2003. С. 183 – 188. <http://www.gao.spb.ru/personal/ivanov/papers/ivmil2003.pdf>
- Плазменная гелиогеофизика / Под ред. Л.М. Зеленого, И.С. Веселовского.* В 2-х т. М.: Физматлит, 2008. Т. 1. 672 с.; Т. 2. 560 с.
- Физика космоса. Маленькая энциклопедия / Под ред. Р.А. Сюняева.* М.: Сов. энциклопедия, 1986. 783 с.
- Alves M.V., Echer E., Gonzalez W.D.* Geoeffectiveness of corotating interaction regions as measured by Dst index // *J. Geophys. Res.* 2006. 111. A07S05, doi:10.1029/2005JA011379.
- Berdichevsky D.B., Farrugia C.J., Thompson B.J. et al.* Halo-coronal mass ejections near the 23rd solar minimum: lift-off, inner heliosphere, and in situ (1 AU) signatures // *Ann. Geophys.* 2002. Vol. 20. P. 891.
- Berdichevsky D.B., Farrugia C.J., Lepping R.P. et al.* Solar-heliospheric-magnetospheric observations on 23March – 26 April 2001: Similarities to observations in April 1979 // *Solar Wind 10, AIP Conference proceedings / M. Velli, editors.* Woodbury, New York, 2003. P. 758 – 761.
- Borovsky J.E., Denton M.H.* Differences between CME-driven storms and CIR-driven storms // *J. Geophys. Res.* 2006. Vol. 111. A07S08, doi:10.1029/2005JA011447.
- Bothmer V.* The solar and interplanetary causes of space storms in solar cycle 23 // *IEEE Transactions on Plasma Science.* 2004. Vol. 32, N 4. P. 1411.
- Brueckner G.E., Delaboudiniere J.-P., Howard R.A. et al.* Geomagnetic storms caused by coronal mass ejections (CMEs): March 1996 through June 1997 // *Geophys. Res. Lett.* 1998. Vol. 25. 3019.
- Burlaga L.F., Skoug R. M., Smith C.W.* Fast ejecta during the ascending phase of solar cycle 23: ACE observations, 1998-1999 // *J. Geophys. Res.* 2001. Vol. 106. 20957.
- Cane H.V., Richardson I G.* Interplanetary coronal mass ejections in the near-Earth solar wind during 1996–2002 // *J. Geophys. Res.* 2003. Vol. 108, A4, 1156, DOI 10.1029/2002JA009817.
- Cane H.V., Richardson I. G., St. Cyr O.C.* The interplanetary events of January–May, 1997, as inferred from energetic particle data, and their relationship with solar events // *Geophys. Res. Lett.* 1998. Vol. 25, N 14. 2517.
- Cane H.V., Richardson I.G., St. Cyr O C.* Coronal mass ejections, interplanetary ejecta and geomagnetic storms // *Geophys. Res. Lett.* 2000. 27, 21, 3591.
- Cliver E.W., Crooker N.U.* A seasonal dependence for the geoeffectiveness of eruptive solar events // *Solar Phys.* 1993. Vol. 145. P. 347.
- Cliver E.W., Hudson H.S.* CMEs: How do the puzzle pieces fit together? // *J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics.* 2002. 64, 231.
- Crooker N.U.* Solar and heliospheric geoeffective disturbances // *J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics.* 2000. 62, 1071.

- Denton M.H., Borovsky J.E., Skoug R.M. et al.* Geomagnetic storms driven by ICME- and CIR-dominated solar wind // *J. Geophys. Res.* 2006. Vol. 111, A07S07, doi: 10.1029/2005JA011436.
- Echer E., Gonzalez W.D.* Geoeffectiveness of interplanetary shocks, magnetic clouds, sector boundary crossings and their combined occurrence // *Geophys. Res. Lett.* 2004. 31, L09808, doi:10.1029/2003GL019199,
- Echer E., Alves M.V., Gonzalez W.D.* A statistical study of magnetic cloud parameters and geoeffectiveness // *Journal of Atmospheric and Solar Terrestrial Physics.* 2005. Vol. 67. P. 839 – 852.
- Farrugia C. J., Jordanova V.K., Thomsen M.F. et al.* A two-ejecta event associated with a two-step geomagnetic storm // *J. Geophys. Res.* 2006a. 111, A11104, doi: 10.1029/2006JA011893.
- Farrugia C.J., Matsui H., Kucharek H. et al.* Survey of intense Sun-Earth connection events (1995-2003) // *Advances in Space Research.* 2006b. Vol. 38, N 3. P. 498 – 502.
- Gonzalez W.D., Tsurutani B.T., Clua de Gonzalez A.L.* Interplanetary origin of geomagnetic storms // *Space Sci. Rev.* 1999. 88, 529.
- Gonzalez-Esparza A., Santillan A., Ferrer J.* A numerical study of the interaction between two ejecta in the interplanetary medium: one- and two-dimensional hydrodynamic simulations // *Ann. Geophys.* 2004. Vol. 22. P. 3741–3749.
- Gopalswamy N.* Space weather study using combined coronagraphic and in situ observations // *Space Weather Study Using Multipoint Techniques*, Edited by Ling-Hsiao Lyu. Pergamon Press, 2002. P. 39
- Gopalswamy N., Lara A., Lepping R.P. et al.* Interplanetary acceleration of coronal mass ejections // *Geophys. Res. Lett.* 2000. 27, 145.
- Gopalswamy N., Lara A., Yashiro S. et al.* Predicting the 1-AU arrival times of coronal mass ejections // *J. Geophys. Res.* 2001a. 106, 29207.
- Gopalswamy N., Yashiro S., Kaiser M. L. et al.* Radio signatures of coronal mass ejection interaction: coronal mass ejection cannibalism? // *Astrophys. J.* 2001b. 548, L91 – L94.
- Gopalswamy N., Yashiro S., Kaiser M. L. et al.* Interplanetary radio emission due to interaction between two coronal mass ejections // *Geophys. Res. Lett.* 2002. 29, GL013606.
- Gopalswamy N., Yashiro S., Michalek G. et al.* Solar source of the largest geomagnetic storm of cycle 23 // *Geophys. Res. Lett.* 2005. 32, L12S09.
- Gopalswamy N., Yashiro S., Akiyama S.* Geoeffectiveness of halo coronal mass ejections // *J. Geophys. Res.* 2007. 112, A06112. doi:10.1029/2006JA012149.
- Gosling J.T.* The solar flare myth // *J. Geophys. Res.* 1993. 98, 18937.
- Gosling J.T., McComas D.J., Phillips J.L., Bame S.J.* Geomagnetic activity associated with Earth passage of interplanetary shock disturbances and coronal mass ejections // *J. Geophys. Res.* 1991. 96, 7831.
- Gosling J.T., Pizzo V J.* Formation and evolution of corotating interaction regions and their three-dimensional structure. // *Space Sci. Rev.* 1999. 89. 21.
- Harrison R. A.* Coronal magnetic storms: a new perspective on flares and the ‘Solar Flare Myth’ debate // *Solar Physics.* 1996. 166, 441.
- Huttunen K.E.J., Koskinen H.E.J., Schwenn R.* Variability of magnetospheric storms driven by different solar wind perturbations // *J. Geophys. Res.* 2002. 107, DOI:10.1029/2001JA900171
- Huttunen K E J., Koskinen H.E.J.* Importance of post-shock streams and sheath region as drivers of intense magnetospheric storms and high-latitude activity // *Ann. Geophys.* 2004. 22, 1729.
- Kane R.P.* How good is the relationship of solar and interplanetary plasma parameters with geomagnetic storms? // *J. Geophys. Res.* 2005. Vol. 110. A02213, doi:10.1029/2004JA010799.
- Kim R.-S., Cho K.-S., Moon Y.-J. et al.* Forecast evaluation of the coronal mass ejection (CME) geoeffectiveness using halo CMEs from 1997 to 2003 // *J. Geophys. Res.* 2005. Vol. 110, A11104, doi:10.1029/2005JA011218.

- Kleimenova N.G., Kozyreva O.V., Breus T.K., Rapoport S.I.* Seasonal variation of magnetic storm influence on myocardial infarctions // *Physics of Auroral Phenomena: Proc. XXXI Ann. Seminar, Apatity*, 2008. P. 203–205, http://www.pgia.ru/seminar/archive/2008/7_heliobiosphere/n_kleimenova.pdf
- Krajcovic S., Krivsky L.* Severe geomagnetic storms and their sources on the sun. // *Astronomical Institute of Czechoslovakia*. 1982. Bull. 33. N 1, 47.
- Li Y., Luhmann J.G., Mulligan T., Hoeksema J.T., Arge C.N., Plunkett S.P., St. Cyr O.C.* Earthward directed CMEs seen in large-scale coronal magnetic field changes, SOHO LASCO coronagraph and solar wind. // *J. Geophys. Res.* 2001. 106, 25103.
- Li Y., Luhmann J.* Solar cycle control of the magnetic cloud polarity and the geoeffectiveness // *J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 2004. 66, 323.
- Lilensten, J. (ed.)* Space Weather : Research Towards Applications in Europe // *Astrophysics and space science library*. Dordrecht, The Netherlands: Springer, 2007. Vol. 344.
- Loewe C.A., Prolls G.W.* Classification and Mean Behavior of Magnetic Storms // *J. Geophys. Res.* 1997. Vol. 102. P. 14209.
- Mayaud P.N.* Derivation, meaning and use of geomagnetic indices // *AGU Geophysical Monograph* 22. 1980.
- Moon Y.-J., Cho K.-S., Dryer M., Kim Y.-H., Bong Su-chan, Chae Jongchul, Park Y.D.* New geoeffective parameters of very fast halo coronal mass ejections // *The Astrophysical Journal*. 2005. 624:414-419.
- Naitamor S.* Coronal Mass Ejection: their sources and geomagnetic disturbances // *Mem. S.A.It.* 2005. Vol. 76. P. 1011.
- Park Y.D., Moon Y.-J., Kim Iraida S., Yun H.S.* Delay times between geoeffective solar disturbances and geomagnetic indices // *Astrophys. Space Science*. 2002. 279, 343.
- Plunkett S.P., Thompson B.J., St.Cyr O.C., Howard R.A.* Solar source regions of coronal mass ejections and their geomagnetic effects // *J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 2001. 63, 402.
- Pulkkinen T.* Space Weather: Terrestrial Perspective // *Living Rev. Solar Phys.* 4. 2007. 1. URL (cited on 18 September 2007): <http://www.livingreviews.org/lrsp-2007-1>
- Pulkkinen T.I., Partamies N., Huttunen K.E.J., Reeves G.D., Koskinen H.E.J.* Differences in geomagnetic storms driven by magnetic clouds and ICME sheath regions // *Geophys. Res. Lett.* 2007. 34, L02105, doi:10.1029/2006GL027775.
- Richardson I.G., Cane H.V.* A survey of interplanetary coronal mass ejections in the near-Earth solar wind during 1996- 2005 // *Solar Wind Eleven / Eds. B. Fleck and T. H. Zurbuchen*. Eur. Space Agency Spec. Publ., 2005. ESA SP-592. P. 755.
- Richardson I.G., Cliver E.W., Cane H.V.* Sources of geomagnetic storms for solar minimum and maximum conditions during 1972-2000 // *Geophys. Res. Lett.* 2001. 28, 2569.
- Schwenn R.* Space Weather: The Solar Perspective // *Living Rev. Solar Phys* 2006, 3, lrsp-2006-2. URL (cited on 18 September 2007): <http://www.livingreviews.org/lrsp-2006-2>.
- Schwenn R., Dal Lago A., Huttunen E., Gonzalez W.D.* The association of coronal mass ejections with their effects near the Earth // *Ann. Geophys.* 2005. Vol. 23. P. 1033 – 1059.
- Skoug R.M., Gosling J.T., Steinberg J.T., McComas D.J., Smith C.W., Ness N.F., Hu Q., Burlaga L.F.* Extremely high speed solar wind: 29-30 October 2003 // *J. Geophys. Res.* 2004. 109, A09102, doi:10.1029/2004JA010494.
- Song H., Yurchyshyn V., Yang G., Tam C., Chen W., Wang H.* The automatic predictability of super geomagnetic storms from halo CMEs associated with large solar flares // *Solar Physics*. 2006. Vol. 238. P.141–165, DOI: 10.1007/s11207-006-0164-8.
- Srivastava N.* Can geoeffectiveness of CMEs be predicted? // *Bull. Astronomical Society of India* 2002. 30, 557.

- Shrivastava N., Venkatakrishnan P.* Solar and interplanetary sources of major geomagnetic storms during 1996-2002 // *J. Geophys. Res.* 2004. Vol. 109. (A10103, doi:10.1029/2003JA010175. 2004)
- St. Cyr O.C., Howard R.A., Sheeley N.R. Jr., Plunkett S.P. et al.* Properties of coronal mass ejections: SOHO LASCO observations from January 1996 to June 1998 // *J. Geophys. Res.* 2000. 105, 18169.
- Valach F., Hejda P., Bochniček J.* Geoeffectiveness of XRA events associated with RSP II and/or RSP IV estimated using the artificial neural network // *Stud. Geophys. Geod.* 2007. Vol. 51, N 4. P. 551 – 562. DOI 10.1007/s11200-007-0032-5.
- Vennerstroem S.* Interplanetary sources of magnetic storms: Statistic study // *J. Geophys. Res.* 2001. 106, 29175.
- Vieira L.E.A., Gonzalez W.D., Echer E., Tsurutani B.T.* Storm-intensity criteria for several classes of the driving interplanetary structures // *Solar Physics.* 2004. Vol. 223, N 1-2. P. 245 – 258.
- Villoresi, G., Breus T.K., Iucci N., Dorman L.I., Rapoport S.I.* The influence of geophysical and social effects on the incidences of clinically important pathologies (Moscow, 1979–1981) // *Physica Medica.* 1994. N 10. P. 79 – 91.
- Wang Y.M., Ye P.Z., Wang S., Zhou G.P., Wang J.X.* A statistical study on the geoeffectiveness of Earth-directed coronal mass ejections from March 1997 to December 2000 // *J. Geophys. Res.* 2002. 107, 10.1029/2002JA009244.
- Wang Y.M., Ye P.Z., Wang S.* Multiple magnetic clouds: Several examples during March-April 2001, // *J. Geophys. Res.* 2003. 108(A10), 1370, doi:10.1029/2003JA009850.
- Watari S., Vandas M., Watanabe T.* Formation of a strong southward IMF near the solar maximum of cycle 23 // *Ann. Geophys.* 2004. 22, 673.
- Webb D.F.* CMEs and the solar cycle variation in their geoeffectiveness // *Proceedings of the SOHO 11 Symposium on From Solar Min to Max: Half a Solar Cycle with SOHO, 2002, Davos, Switzerland. A symposium dedicated to Roger M. Bonnet / Ed. A. Wilson. ESA SP-508, 2002. P. 409 – 419.*
- Webb D.F., Jackson B.V., Hick P.* Geomagnetic Storms and Heliospheric CMEs as Viewed from HELIOS // *Solar Drivers of Interplanetary and Terrestrial Disturbances.* 1996. ASP Conference Series 95, 167.
- Webb D.F., Cliver E.W., Crooker N.U. et al.* Relationship of halo coronal mass ejections, magnetic clouds, and magnetic storms. // *J. Geophys. Res.* 2000. 105, 7491.
- Webb D.F., Crooker N.U., Plunkett S.P., St.Cyr O.C.* The solar sources of geoeffective structure // *SpaceWeather.* 2001. AGU Geophys. Monogr. 125, p.123, 2001.
- Wu C.-C., Lepping, R.P.* Effects of magnetic clouds on the occurrence of geomagnetic storms: The first 4 years of Wind // *J. Geophys. Res.* 2002a. 107, 1314. 10.1029/2001JA000161.
- Wu C.-C., Lepping R.P.* Effect of solar wind velocity on magnetic cloud-associated magnetic storm intensity // *J. Geophys. Res.* 2002b. 107, 1346, doi:10.1029/2002JA009396.
- Wu C.-C., Lepping R.P.* Relationships for predicting magnetic cloud-related geomagnetic storm intensity // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics.* 2005. Vol. 67, N. 3. P. 283.
- Xie H., Gopalswamy N., Manoharan P.K., Lara A., Yashiro S., Lepri S.T.* Long-lived geomagnetic storms and coronal mass ejections // *J. Geophys. Res.* 2006. Vol. 111. A01103, doi:10.1029/2005JA011287.
- Yashiro S., Gopalswamy N., Akiyama S. et al.* Visibility of coronal mass ejections as a function of flare location and intensity // *J. Geophys. Res.* 2005. Vol. 110, A12S05, doi:10.1029/2005JA011151.
- Yermolaev Yu.I., Yermolaev M.Yu.* Statistic study on the geomagnetic storm effectiveness of solar and interplanetary events // *Adv. Space Res.* 2006. Vol. 37, N 6. P. 1175 – 1181.
- Yermolaev Yu.I., Yermolaev M.Yu., Zastenker G.N., Zelenyi L.M., Petrukovich A.A., Sauvaud J.-A.* Statistical studies of geomagnetic storm dependencies on solar and interplanetary events: a review // *Planet. and Space Science.* 2005a. Vol. 53, N 1/3. P. 189 – 196.

- Yermolaev Yu.I., Yermolaev M.Yu., Nikolaeva N.S.* Comparison of interplanetary and magnetospheric conditions for CIR-induced and ICME-induced magnetic storms // European Geosciences Union. Geophysical Research Abstracts, Vol. 7, 01064, 2005b.
- Yermolaev Yu.I., Yermolaev M.Yu., Nikolaeva N.S., Lodkina L.G.* Interplanetary conditions for CIR-induced and MC-induced geomagnetic storms // Bulg. J. Phys. 2007. Vol. 34. P. 128–135.
- Yurchyshyn V., Wang H., Abramenko V.* Correlation between speeds of coronal mass ejections and the intensity of geomagnetic storms // Space Weather. 2004. Vol. 2. (S02001, doi: 10.1029/2003SW000020, 2004).
- Zhang J., Dere K.P., Howard R.A., Bothmer V.* Identification of Solar Sources of Major Geomagnetic Storms between 1996 and 2000 // Astrophys. J. 2003. 582. 520.
- Zhang J.-Ch., Liemohn M.W., Kozyra J.U., Lynch B. J., Zurbuchen T.H.* A statistical study of the geoeffectiveness of magnetic clouds during high solar activity years // J. Geophys. Res. 2004. 109, A09101, doi:10.1029/2004JA010410.
- Zhao X.P., Webb D.F.* Source regions and storm effectiveness of frontside full halo coronal mass ejections // J. Geophys. Res. 2003. 108, 1234, doi:10.1029/2002JA009606, 2003.

Сведения об авторах

ЕРМОЛАЕВ Юрий Иванович – д-р физ.-мат. наук, заведующий лабораторией Института космических исследований РАН, Москва, 117997, Профсоюзная, 84/32. Тел.: 333-13-88, e-mail: Yermol@iki.rssi.ru

ЕРМОЛАЕВ Михаил Юрьевич – младший научный сотрудник Института космических исследований РАН, Москва, 117997, Профсоюзная, 84/32. Тел.: 333-13-88, e-mail: Yermol@iki.rssi.ru

SOLAR AND INTERPLANETARY SOURCES OF GEOMAGNETIC STORMS: SPACE WEATHER ASPECTS

Yu.I. Yermolaev, M.Yu. Yermolaev

Space Research Institute, Moscow, Russia

Abstract. A brief review of modern concept on solar-terrestrial links responsible for transportation of solar disturbances and generation of magnetic storms on the Earth is presented. Quantitative estimations for probabilities of magnetic storm generation by different solar and interplanetary phenomena are made and discussed, efficiencies of processes of magnetic storm generation by different large-scale solar wind streams are compared.

Keywords: magnetic storms, flares, coronal mass ejections, magnetic clouds.