
ИССЛЕДОВАНИЕ СВЯЗИ ПАРАМЕТРОВ ЛОКАЛИЗАЦИИ СОЛНЕЧНЫХ ИСТОЧНИКОВ МАГНИТНЫХ ОБЛАКОВ С ИХ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ И СУББУРЕВОЙ АКТИВНОСТЬЮ

STUDYING THE RELATIONSHIP OF LOCALIZATION PARAMETERS OF SOLAR SOURCES OF MAGNETIC CLOUDS WITH THEIR CHARACTERISTICS AND SUBSTORM ACTIVITY

Н.А. Бархатов

Нижегородский государственный педагогический университет им. К. Минина,
Нижний Новгород, Россия, nbarkhatov@inbox.ru

Е.А. Ревунова

Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет,
Нижний Новгород, Россия, revunova.elena@mail.ru

Р.В. Романов

Нижегородский государственный педагогический университет им. К. Минина,
Нижний Новгород, Россия, r-o-m-e-n@yandex.ru

О.М. Бархатова

Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет,
Нижний Новгород, Россия, o.barkhatova@inbox.ru

С.Е. Ревунов

Нижегородский государственный педагогический университет им. К. Минина,
Нижний Новгород, Россия, revunov@inbox.ru

N.A. Barkhatov

Minin Nizhny Novgorod State Pedagogical University,
Nizhny Novgorod, Russia, nbarkhatov@inbox.ru

E.A. Revunova

Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering,
Nizhny Novgorod, Russia, revunova.elena@mail.ru

R.V. Romanov

Minin Nizhny Novgorod State Pedagogical University,
Nizhny Novgorod, Russia, r-o-m-e-n@yandex.ru

O.M. Barkhatova

Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering,
Nizhny Novgorod, Russia, o.barkhatova@inbox.ru

S.E. Revunov

Minin Nizhny Novgorod State Pedagogical University,
Nizhny Novgorod, Russia, revunov@inbox.ru

Аннотация. Предложена методика локализации и определения ориентации протяженных солнечных источников магнитных облаков по данным коронографов и фотографиям фотосферы инструментов EIT и MDI космической миссии SOHO. При оценке вероятности формирования магнитных облаков для них использована простая цилиндрическая бессиловая модель. Установлено, что протяженные источники, имеющие небольшой наклон к солнечному экватору и находящиеся на краях солнечного диска, в отличие от непротяженных и сильно наклоненных, имеют возможность сгенерировать расширяющиеся облака, которые с высокой вероятностью могут достигнуть магнитосферы, как и облака от источников вблизи нулевого меридиана и низких широт.

Определена зависимость экстремальных значений суббуревой активности по индексу AL от параметров анализируемых солнечных источников в интервалы воздействия на земную магнитосферу магнитных облаков. Отмечено отсутствие суббурь, ассоциированных с протяженными источниками вне диапазона гелиоширот $\sim 5\text{--}20^\circ$. Установленные связи координат солнечного источника с геомагнитной активностью как оболочки, так и тела магнитного облака согласуются с наиболее вероятным распределением магнитоактивных областей на солнечном диске.

Abstract. We propose a method for determining location and orientation of extended solar sources of magnetic clouds, using coronagraph data and SOHO EIT/MDI images of the photosphere. To estimate the probability of formation of magnetic clouds, we use a simple cylindrical force-free model. We have established that more extended sources and those having a slight inclination to the solar equator and located on the solar limb as compared to those that are nonextended and strongly inclined can generate expanding clouds, which with high probability can reach the magnetosphere like clouds from a source near the zero meridian and low latitudes.

We determine the relationship between extreme values of substorm activity and parameters of solar sources under study during the impact of magnetic clouds on Earth's magnetosphere from the AL index. We note that there are no substorms associated with extended sources outside the heliolatitude range $\sim 5\text{--}20^\circ$. The established relationship between solar source coordinates and geomagnetic activity of the magnetic cloud sheath and body are consistent with the most probable distribution of magnetoactive regions over the solar disk.

Keywords: solar activity, solar wind, coronal plasma flow, coronal mass ejection, solar flare, geomagnetic activity, geomagnetic disturbances, magnetosphere.

Ключевые слова: солнечная активность, солнечный ветер, корональный плазменный поток, корональный выброс массы, солнечная вспышка, геомагнитная активность, геомагнитные возмущения, магнитосфера.

ВВЕДЕНИЕ

Корональные выбросы массы (КВМ) и зачастую сопровождающие их вспышки являются самыми высокоэнергетическими солнечными явлениями [Иванов, 1996; Burlaga et al., 2003; Neugebauer, Liewer, 2003; Николаева и др., 2011]. Несмотря на то, что КВМ сопровождается выделением большого количества энергии, вспышками и всплесками микроволнового излучения, источники КВМ часто не выделяются на фоне короны или фотосферы и иногда могут определяться только по остаточным явлениям. Особого внимания заслуживает такой вид КВМ (а точнее, сопутствующее ему явление), как магнитное облако (МО). В отличие от собственно коронального выброса, МО может, практически не имея механического импульса, обладать гигантской энергией магнитного поля [Kilpua et al., 2012]. Из-за крайне низкого содержания частиц МО слабо подвержено гравитации Солнца и может увеличивать удельную энергию магнитного поля в результате сжатия при взаимодействии с другими плотными структурами солнечного ветра [Бархатова и др., 2017; Манакова и др., 2016]. Анализ МО и долгосрочный прогноз его геомагнитной эффективности затруднены вследствие того, что уединенное МО — редкое явление, а его источник трудно обнаружить на фоне возмущенной солнечной короны или фотосферы. Вместе с тем предполагается, что высокий уровень геоэффективности КВМ обусловлен низкими гелиоширотами источников КВМ [Kilpua et al., 2011] и экваториальным отклонением медленных и слабых КВМ, происходящих из средних и высоких гелиоширот [Liu et al., 2008].

В силу практически северной ориентации геомагнитного поля в дневной части магнитосферы логичен подход к построению статистических зависимостей геомагнитной эффективности от структур солнечного ветра, имеющих заметную отрицательную B_z -компоненту межпланетного магнитного поля (ММП) [Wu, Lepping, 2002; Бархатов и др., 2017, 2018]. Действительно, взрывные пересоединения геомагнитного и межпланетного магнитных полей, отвечающие за глобальные геомагнитные бури, наблюдаются только при отрицательной B_z -компоненте ММП.

Прогноз геомагнитной эффективности МО по величине отрицательной B_z -компоненты ММП возможен с точностью более 60 %. Для повышения качества прогноза требуются данные об источниках и стартовых физических характеристиках МО. Необходимо также максимально точное отождествление проходящих через патрульные КА структур с МО [Рязанцева и др., 2003]. В последнее время этому посвящены целые космические миссии, например TRACE.

Трудности идентификации МО связаны с тем, что коронографы отслеживают возмущения концентрации

протонов солнечного ветра, вызванные вторжением высокоэнергичных корональных протонов в статичный диффузный фон протонов, испаряемых Солнцем. В силу этого обстоятельства МО даже в профиль плохо видны на коронографах. Прохождения уединенных МО к Земле вообще не фиксируются коронографами, и определение их вероятных источников возможно только по снимкам фотосферы Солнца. Таким образом, обычно имеются структура, измеренная на патрульных КА, с набором вероятных солнечных источников и разрозненные данные о перемещении этой структуры. Задача о параметрах солнечных структур при перемещении от Солнца до патрульных КА решается путем численного или, в простейших случаях, аналитического моделирования. Она облегчается при увеличении числа коронографов, но проблема регистрации МО по данным коронографов все равно остается. Наш подход к моделированию МО заключается в том, что их магнитная часть представляется замкнутой структурой типа бессиловой магнитной трубки. При этом его вещество представляет собой плазму с вложенным магнитным полем, уносимую с Солнца при эрупции. Вместе с тем тело КВМ типа гало хорошо видно на коронографах, и это обстоятельство позволяет достаточно надежно определить источник КВМ на солнечном диске и легко идентифицировать КВМ на патрульных КА [Wang et al., 2011]. В случае таких КВМ в них включены и МО, поэтому источник МО также может быть определен. Наш подход к обнаружению КВМ, включая МО, и установлению их солнечных источников заключается в использовании этих упомянутых выше возможностей.

Другая проблема изучения особенностей переноса КВМ — их огромные размеры. Даже поперечные размеры КВМ могут достигать 1 а.е. Гипотетическую флотилию патрульных КА в данном случае можно сравнить с проволочным зондом в теле кита, и по их измерениям нельзя получить даже плоского сечения исследуемой структуры. Поэтому решение подобных задач целиком зависит от адекватности моделей. В данный момент самыми распространенными являются модели МО, предполагающие их локальную цилиндрическую симметрию. Такие модели позволяют получить динамику полей в плоском сечении структуры. Учитывая малые размеры геомагнитосферы по сравнению с КВМ, достаточно вычислить параметры на сечении структуры в плоскости эклиптики, затем сравнить их с измерениями на патрульных КА и оценить адекватность создаваемой модели. Такой подход позволяет решить обратную задачу по определению модельных параметров КВМ с помощью измерений на патрульных КА. Далее полученные модельные параметры позволяют сопоставить обнаруженную структуру КВМ с ее солнечным источником.

Принимая во внимание все указанные проблемы, предлагаемое исследование ориентировано на установление связи координат солнечных областей ло-

кализации источников плазменных потоков с уровнем суббуревой геомагнитной активности. Разрабатываемый подход к исследованию плазменного потока типа МО заключается в представлении его магнитной части в виде бессиловой магнитной трубки, уносимой от Солнца при наблюдаемой эрупции [Бархатов, Калинина, 2010].

Параметрические записи на КА часто отражают собственно тело магнитного облака и в некоторых случаях ударную волну (УВ) и следующую за ней турбулентную оболочку (ТО) (рис. 1). Поэтому несмотря на то, что облака движутся в околоземном космосе как единое целое, следует рассматривать геомагнитную эффективность элементов их структуры по отдельности. В ТО происходят процессы, аналогичные процессам в магнитослое (переходной области) за земной ударной волной. Мощность магнитозвуковых пульсаций в теле межпланетного коронального выброса массы (МКВМ) на порядок меньше мощности турбулентных возмущений в оболочке МО, однако из-за перемежаемости турбулентности применение спектральной методики для сепарации оболочки от тела МКВМ затруднено.

Сопоставление существующих моделей МО [Бархатов, Калинина, 2010; Бархатов и др., 2014а, 6] показало, что все они согласуются друг с другом и их усложнение не приводит к существенному уточнению основных параметров облаков (величина магнитного поля на оси облака, его радиус, прицельный параметр по отношению к Земле, ориентация оси в межпланетном пространстве). В связи с этим при оценке ориентации МО мы используем для них простую цилиндрическую бессловую модель (рис. 2).

1. ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДИКА ЛОКАЛИЗАЦИИ СОЛНЕЧНОГО ИСТОЧНИКА МО

Статистическое исследование зависимостей характеристик источников МО от расположения на солнечном диске выполнено по 30 событиям МО, отмеченным с 1997 по 2012 г. Согласно каталогам: 1) корональных выбросов вещества LASCO CME Catalog [<http://lasco-www.nrl.na-vy.mil/index.php?p=content/cmelist>]; 2) крупномасштабных явлений солнечного ветра [https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list]; 3) вспышек с указанием присутствия CME и ударных волн [<http://umtof.umd.edu/sem>]; 4) H α -вспышек [ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/STP/SOLAR_DATA]; 5) рентгеновских вспышек Virtual Solar Observatory [<http://vso.nso.edu/cgi/catalogue>] — для МО было установлено ~70 возможных солнечных источников.

Первоначальным этапом локализации солнечного источника МО является установление числа возможных источников за сутки, начиная от времени, которое рассчитывается исходя из минимальной скорости распространения КВМ от Солнца до патрульного КА. Минимальная скорость принимается равной сумме средней скорости МО (по данным КА) и средней скорости магнитного звука (по данным КА). Источники МО являются протяженными, поэтому мы рассматривали их угловые координаты, ближайшие к

центру гелиоцентрической декартовой системы координат. Этот подход видится наиболее удобным для рассмотрения статистики, связанной с солнечными координатами источников, и будет лучше отражать их геоэффективность, поскольку чем ниже по широте простирается источник, тем большая часть КВМ попадет в околоземную область. Те же соображения касаются и долгот.

В общем случае определение координат источника КВМ — сложная задача. Во-первых, многие события сопровождаются каскадными эруптивными процессами с вовлечением петель из нескольких областей. Во-вторых, во многих случаях разрешения коронографа не хватает для наблюдения солнечных пятен и самого процесса эрупции. В-третьих, структуры многих источников далеки от представления потоковой петли в виде арки (например, сигмоиды).

В данном исследовании предлагается следующая методика установления местоположения солнечного источника. В качестве источников МО нами принимаются области всплыва и эрупции потоковых петель (волокон). Определение их координат сводится к определению координат видимых областей выхода этих структур на фотосферу (ножек) по дан-

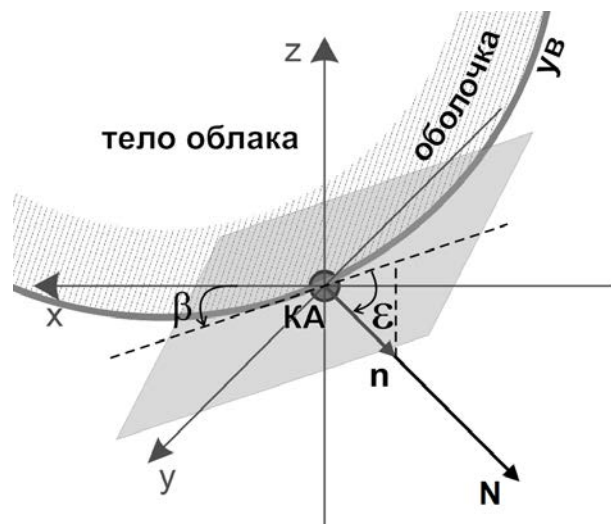


Рис. 1. Схематичное изображение структуры магнитного облака, включающей тело, оболочку и ударную волну (УВ) с условным плоским фронтом, рассматриваемым в точке пересечения его КА. Азимутальный β и широтный углы ϵ характеризуют ориентацию нормали n к ударной волне облака в межпланетном пространстве в системе координат GSE

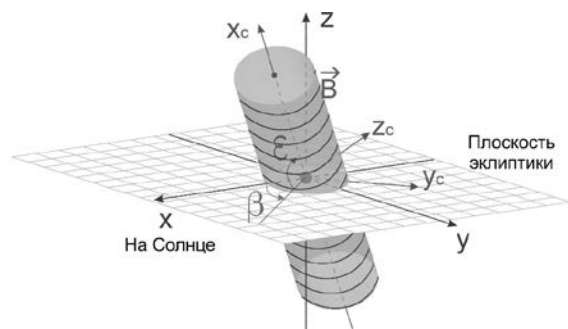


Рис. 2. Ориентационные углы МО, представляемого бессловой цилиндрической магнитной трубкой [Бархатов и др., 2009].

ным коронографов. В случае высокоэнергетических событий проблем практически не возникает, поскольку петли контрастируют с фотосферой и солнечные пятна хорошо различимы. В случае каскадного процесса под источником мы подразумеваем область, в которой конечная петля разрушилась (ножки этой петли) и стала невидимой в частотном диапазоне коронографа.

Если возможностей коронографа не хватает для наблюдения эрупции, мы используем косвенные признаки эрупции (например, постэруптивные аркады, отклонение силовых линий вокруг невидимого центра, области потемнения). Область всплывания петли определяется по аркадам, а координаты ножек — по отклонениям силовых линий вокруг невидимого центра в областях, где заканчиваются аркады. Координаты источников, отличающихся от классических арочных потоковых петель, сами по себе бесполезны для статистики, поскольку не отражают масштаба события. В таких случаях вместо точечных координат ножек мы использовали значения широт и долгот границ областей, вовлеченных в эрупцию.

В период высокой солнечной активности число вероятных источников KBM может превышать десятков в течение суток. Поэтому следующим критерием отбора вероятных источников является наличие рентгеновских вспышек и всплесков микроволнового излучения. Существует мнение, что эти явления в некоторых случаях ассоциированы с KBM [Hundhausen, 1999], и поскольку они описываются с минутным разрешением, то их можно сопоставить со снимками солнечной фотосферы EIT/SOHO и определить координаты вспышки. Однако многие KBM сопровождаются вспышками C-класса и ниже, которые могут вообще не выделяться на фоне рентгеновского излучения активных областей Солнца. К тому же надо иметь в виду, что привязка источников KBM к координатам вспышек, сопровождающих эрупцию, хаотизирует статистику, так как вспышки зачастую происходят в различных областях одного и того же протяженного источника.

Результаты применения предлагаемой методики установления местоположения источника МО наиболее легко проверяются на событиях KBM типа гало, которые на снимках LASCO SOHO выглядят как замкнутые ореолы вокруг диска, закрывающего Солнце. Для гало, выбрасываемого в противоположную от Земли сторону, необходимо привлекать данные по рентгену и микроволновому излучению. В удачных случаях разрешение коронографа LASCO C2 составляет 24 мин, и этого вполне достаточно для сопоставления с вероятным источником на снимках EIT/SOHO в доступном диапазоне (чаще всего 195 Å). Во всех возможных случаях полученные координаты источников KBM/МО сопоставлялись с координатами солнечных пятен в районе источника выброса по снимкам SOHO/MDI (рис. 3, а). Удовлетворительным считалось совпадение с отклонением не более $2\text{--}3^\circ$ по широте. При определении координат источника также учитывались качания КА SOHO вокруг оси X GSE в диапазоне $\sim \pm 7.85^\circ$. Углы качаний для каждого случая рассчи-

тывались по движению звезд на разностных снимках LASCO C3 в суточном интервале или чуть менее (рис. 3, б, в).

В данном случае (рис. 3) наклон солнечного экватора кажущийся. Если отследить движение звезд по снимкам LASCO C3, их суточный трек будет иметь угол $\sim -7.35^\circ$ к горизонтали, т.е. полученные координаты источников нужно будет повернуть на угол $\sim +7.35^\circ$. Концентрация частиц в KBM как минимум в два раза выше, чем в возмущенном солнечном ветре, и в десять раз выше, чем в спокойном. Поэтому определение MKBM по параметрам, измеряемым на патрульных КА, не представляет труда. Исследуемое МО, сопутствующее MKBM, имеет один с ним источник и, соответственно, координаты источника.

На основе полученных координат можно получить также и другие параметры источников: их угловую протяженность и угол наклона в картинной (как источник виден с коронографа) плоскости и в декартовой гелиоцентрической системе координат. Следует ожидать, что из-за дифференциального вращения Солнца источники МО будут вытянуты под острыми углами к гелиографическому экватору: отрицательными — в северном полушарии и положительными — в южном.

В случаях, когда одной исследуемой структуре могли соответствовать два источника KBM типа гало, сравнивались скорости структур, измеренные на патрульных КА. Второй KBM должен иметь более высокую скорость, чтобы догнать (возможно, и перегнать) первый. Поэтому определяются скорости соответствующих уплотнений среды, отождествляемых с MKBM, и устанавливается их очередность в соответствии с источниками. Надо сказать, что ситуация, когда второй KBM обогнал более медленный первый на расстоянии в 1 а.е., — исключительная редкость, даже если время между стартами соответствующих KBM на Солнце составляет всего несколько часов.

Также редка ситуация, когда второй, более скоростной KBM проходит сквозь первый. Чаще всего второй, более скоростной KBM догоняет первый и поджигает его вместе со структурами, которые ему сопутствуют, т.е., как правило, хронологическая последовательность наблюдения структур, отождествляемых с MKBM, соответствует хронологической последовательности активизаций источников. В случаях с двумя вероятными источниками исследуемое МО часто зажато между двумя выбросами и имеет две ударно-волновых переходных области — впереди и позади. В этом случае источником второго МО считается источник первого KBM. Заметим, что сопутствующее МО не всегда следует позади ведущего MKBM, а может находиться внутри выброса или даже следовать впереди него, имея перед собой небольшое уплотнение среды, но не турбулентную оболочку.

Важным параметром структур, измеряемых на патрульных КА, является поток магнитного поля через сечение потоковой трубки (аксиального магнитного поля). Обычно этот поток вычисляется исходя из принимаемой модели и состоит из аксиальной и азимутальной составляющих (тороидальной и полоидальной в случае модели тора). Наш подход заключа-

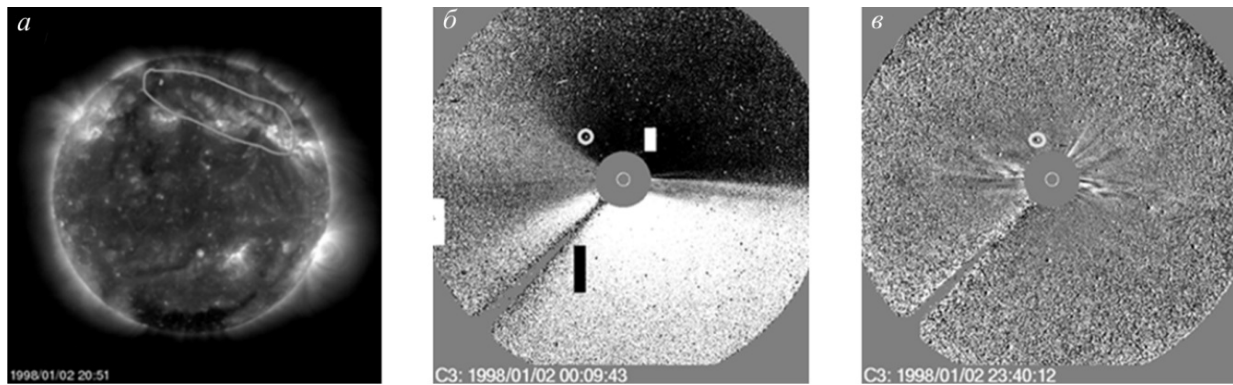


Рис. 3. Снимки SOHO, используемые для определения координат источников КВМ/МО: а — анализируемая область солнечных пятен в районе источника выброса на длине волны 195 Å (MDI); б, в — КВМ, кружком отмечена неподвижная звезда, относительно которой определялись углы качания (LASCO C3)

ется в упрощении задачи исходя из физических соображений. В солнечном ветре магнитные структуры практически никогда не перемещаются свободно из-за относительно малого механического импульса. Они перемещаются в сжатом состоянии из-за торможения о ведущий МКВМ (в силу большей плотности быстрее теряющий скорость из-за гравитации Солнца) или из-за давления другого МКВМ, движущегося позади с большей скоростью. При сжатии магнитной потоковой трубки азимутальное магнитное поле уменьшается, а аксиальное увеличивается в силу сохранения первого и второго адиабатических инвариантов, т. е. чем сильнее сжата магнитная потоковая трубка поперек оси, тем большую аксиальную компоненту магнитного поля она содержит. Ориентация магнитного поля наибольшей напряженности будет максимально близка к аксиальной.

2. ИССЛЕДОВАНИЕ СВЯЗИ ПАРАМЕТРОВ СОЛНЕЧНЫХ ИСТОЧНИКОВ КВМ МЕЖДУ СОБОЙ И С ХАРАКТЕРИСТИКАМИ МО

Рассмотрим связи локализационных и ориентационных параметров солнечных источников КВМ между собой и с характеристиками МО. Помимо собственно координат солнечного источника КВМ, наиболее объективными будут данные об угловой ориентации его видимой части (волокна, магнитной потоковой нити) на солнечной сфере относительно гелиографического экватора, а также о протяженности источника, измеряемой в градусах. Поэтому есть смысл рассмотреть зависимость этих двух параметров от координат источника на солнечном диске. Под координатами источника в дальнейшем мы будем понимать минимальную широту протяженного источника и соответствующую ей долготу. Изучение зависимостей измеренных на КА параметров структур МО от параметров солнечных источников и связи этих параметров между собой выполнялось с помощью корреляционного анализа. Были выявлены следующие закономерности.

2.1. Зависимость угловой ориентации видимой части солнечного источника от его координат

Установлено, что чем источник ближе к гелиографическому экватору, тем более он вытянут в экваториальном направлении. И наоборот, чем дальше источник от экватора, тем он более вытянут в меридиональном направлении. Это особенно хорошо видно для северных и южных широт западного полушария, где с коэффициентом корреляции $R=0.72$ прослеживается минимум наклона источника на нулевых широтах (рис. 4). По всей вероятности, это является следствием влияния дифференциального вращения фотосферы на источник. Долготная зависимость угла наклона источника, соответствующая минимальной широте протяженного источника, проявляется слабо. Тем не менее можно сделать вывод, что углы наклона протяженного источника уменьшаются с увеличением долготы. Последнее может быть объяснено особенностями расширения магнитного облака, вследствие которых МО из «лежачих» (т. е. практически параллельных плоскости солнечного экватора [Бархатов, Калинина, 2010]) источников с периферии солнечного диска расширяются преимущественно в экваториальном направлении и вероятнее могут воздействовать на околоземное пространство, чем МО из «стоячих» (т. е. приподнятых над плоскостью солнечного экватора более чем на 60°) источников. МО из областей вблизи нулевого меридиана достигнут земной магнитосферы независимо от ориентации протяженных источников.

2.2. Распределение солнечных источников различной протяженности

Наблюдается зависимость протяженности источника (измеряемой в градусах) от его минимальной широты с минимумом в районе экватора. Особенно четко эта зависимость проявлена для северо-восточной части солнечного диска (рис. 5), причем для северного полушария она более выражена, чем для южного. Таким образом, с увеличением широты источника уменьшается вероятность регистрации МО в плоскости эклиптики, в которой находится патрульный КА.

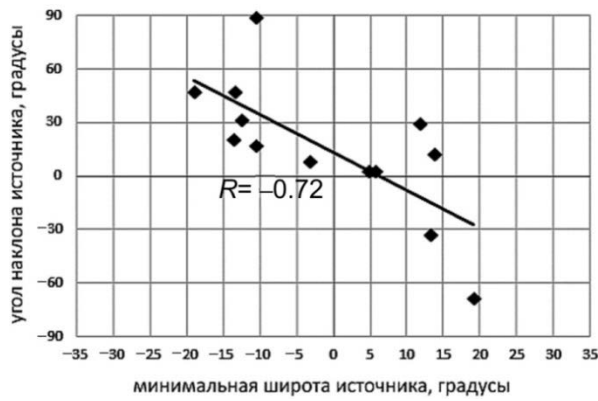


Рис. 4. Зависимость наклона протяженного источника к солнечному экватору от минимальной широты (в западном полушарии)

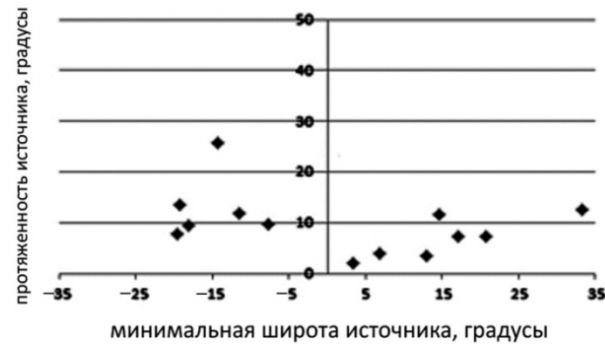


Рис. 5. Распределение протяженности источника по широте для восточной части солнечного диска

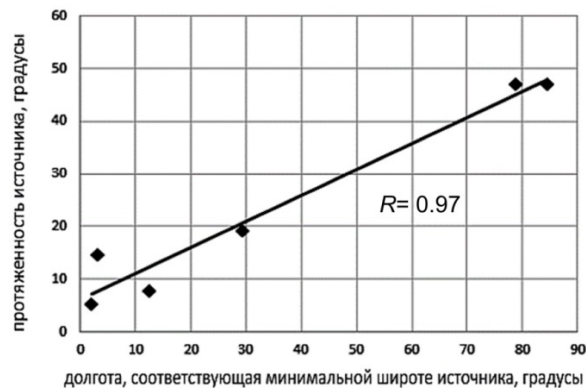


Рис. 6. Зависимость протяженности источника от долготы, соответствующей минимальной широте (для западной части солнечного диска)

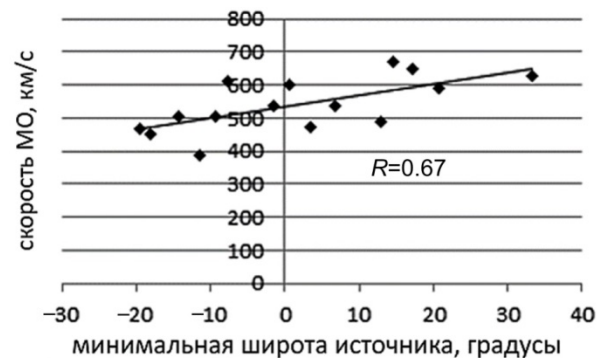


Рис. 7. Зависимость скорости МО от минимальной широты источника

Однако для расположенных на высоких широтах протяженных источников, генерирующих более масштаб-

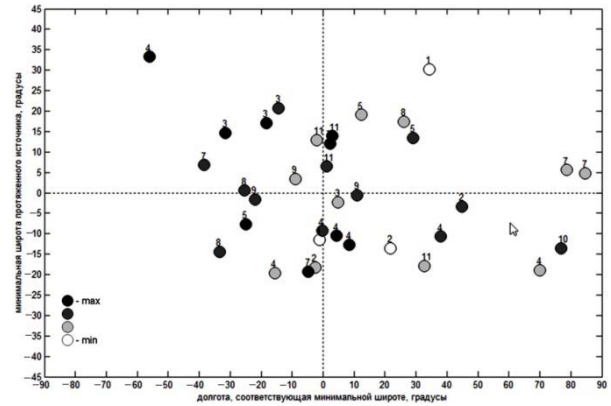


Рис. 8. Зависимость скорости МО от минимальной широты и соответствующей ей долготы протяженного источника. Цвет маркеров (от белого до черного) характеризует скорости (от 400 до 600 км/с и выше), цифрой указан месяц регистрации для каждого события

ные МО, вероятность регистрации МО в околоземном пространстве существует.

Протяженность солнечных источников с минимальной широтой протяженного источника в районе полуденного меридиана растет с долготой от минимального значения $\sim 10^\circ$ как в восточном, так и в западном направлении (рис. 6). Действительно, протяженные источники на краях солнечного диска, в отличие от непротяженных, имеют шанс сгенерировать расширяющиеся МО, которые достигнут магнитосферы.

2.3. Зависимость скорости МО от минимальной широты протяженного источника и от соответствующей ей долготы

Для северного полушария отмечается прямая зависимость ($R > 0.45$) скорости МО от широты. Заметно, что скорость структуры тем выше, чем севернее и восточнее располагается ее предполагаемый источник на Солнце (рис. 7, 8).

Зависимость скорости МО от долготы источника в северном и южном полушариях Солнца по квадрантам описывается коэффициентом корреляции R от 0.5 до 0.7. Зеркальной симметрии в анализируемой зависимости для южного полушария в наших данных не наблюдается.

На рис. 8 представлено пространственное распределение источников МО на солнечном диске, иллюстрирующее распределение скоростей МО. Наблюдаемые увеличения числа высокоскоростных МО, привязанных к восточной части солнечного диска, и числа медленных МО, привязанных к западной части, отражают последствия спирального движения потока солнечного ветра, обусловленного солнечной угловой скоростью. В первом случае спираль закручена слабее и МО регистрируются ближе к линии Солнце–Земля.

2.4. Зависимость максимальной напряженности магнитного поля в МО от минимальной широты протяженного источника и от соответствующей ей долготы

Распределение максимальной напряженности магнитного поля (МП) МО в зависимости от мини-

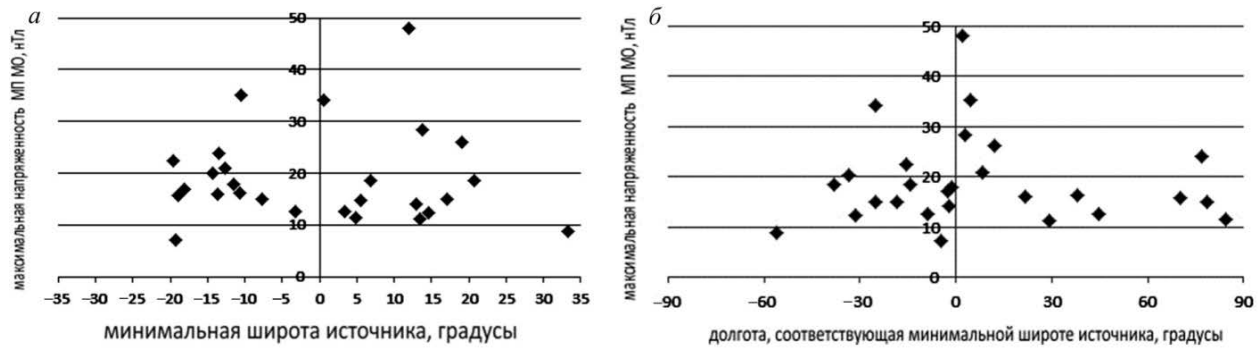


Рис. 9. Распределение максимальной напряженности магнитного поля МО в зависимости от минимальной широты (а) и от долготы, соответствующей минимальной широте источника, для обоих полушарий (б)

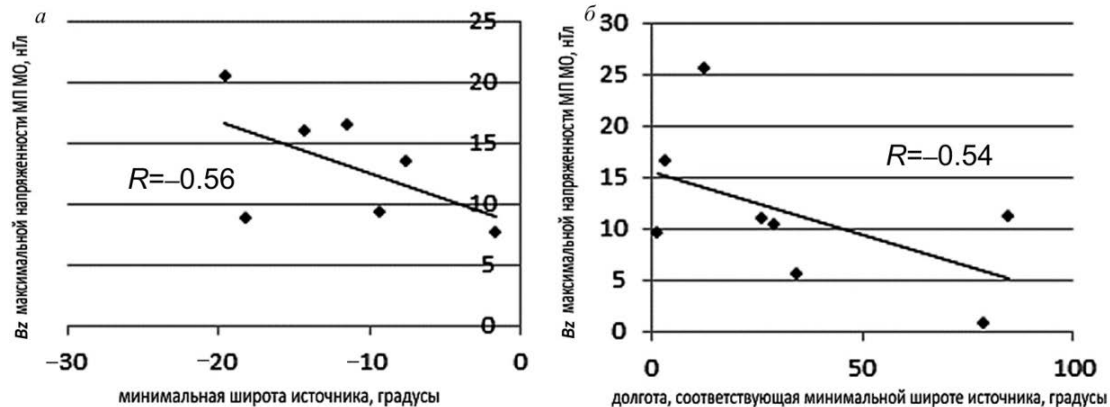


Рис. 10. Зависимость B_z -компоненты максимальной напряженности МП МО от минимальной широты (а) и соответствующей ей долготы (б) источника в южном полушарии

мальной широты протяженного солнечного источника демонстрирует значения до ~ 50 нТл на широтах $15\text{--}20^\circ$ с минимальными значениями порядка ~ 10 нТл в районе гелиографического экватора (рис. 9, а). При этом максимальные значения МП отвечают областям вблизи полуденного меридиана (рис. 9, б). Таким образом, для большой группы магнитных структур имеется прямая широтная зависимость их максимального магнитного поля от координат источника. Эта зависимость с минимумом в районе экватора ($R \sim -0.6$) особенно отчетливо выражена для северо-восточного квадранта. Максимальная напряженность МП МО возрастает с увеличением северных и южных широт. В целом максимальная напряженность МП МО имеет слабую обратную зависимости от долготы, соответствующей минимальной широте источника. Для западного полушария обратная зависимость максимальной напряженности МП МО от долготы источника (до $R \sim -0.7$) выражена сильнее.

2.5. Зависимость модуля B_z -компоненты максимальной напряженности МП в МО от минимальной широты источника и от соответствующей ей долготы

Зависимости модуля B_z -компоненты максимальной напряженности МП структуры от минимальной широты и соответствующей ей долготы солнечного источника демонстрируют минимум в районе гелиографического экватора и максимум ($\sim 20\text{--}25$ нТл) в районе полуденного меридиана (рис. 10). Следовательно, с ростом широты модуль B_z -компоненты растет, а с

ростом долготы — уменьшается. В целом модуль B_z -компоненты максимальной напряженности МП МО возрастает с ростом северных и южных минимальных широт протяженного источника. Для северного полушария зависимости проявляются более отчетливо, чем для южного.

Ориентацию зарегистрированного МО мы рассматриваем в рамках цилиндрической модели, представляемой широтным углом ϵ и долготным (азимутальным) углом β . Ниже представлены результаты исследования закономерностей ориентации МО, определяемой параметрами солнечных источников.

2.6. Широтный угол вектора МП МО

Распределения широтного угла вектора МП МО в зависимости от минимальной широты протяженного солнечного источника и соответствующей ей долготы демонстрируют минимальные значения модуля широтного угла вектора МП МО в районе гелиографического экватора (рис. 11, а) и максимальные (до $\sim 60\text{--}90^\circ$) в районе полуденного меридиана (рис. 11, б). С ростом солнечной широты источника широтный угол увеличивается, а с ростом солнечной долготы — уменьшается. Для северного полушария (северо-востока и северо-запада) зависимости проявляются более отчетливо, чем для южного. Такая особенность в поведении широтного угла и, как следствие, полярного угла может свидетельствовать о наиболее вероятном формировании «лежачих» облаков источниками, находящимися на низких широтах (вблизи солнечного экватора) [Бархатов, Калинина, 2010].

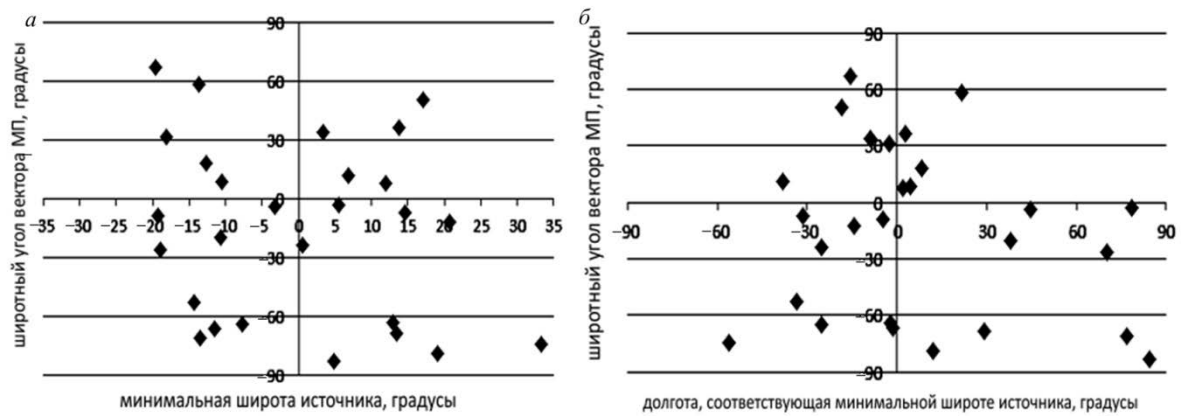


Рис. 11. Распределение широтного угла вектора МП в зависимости от минимальной широты источника (а) и от долготы, соответствующей этой широте (б)

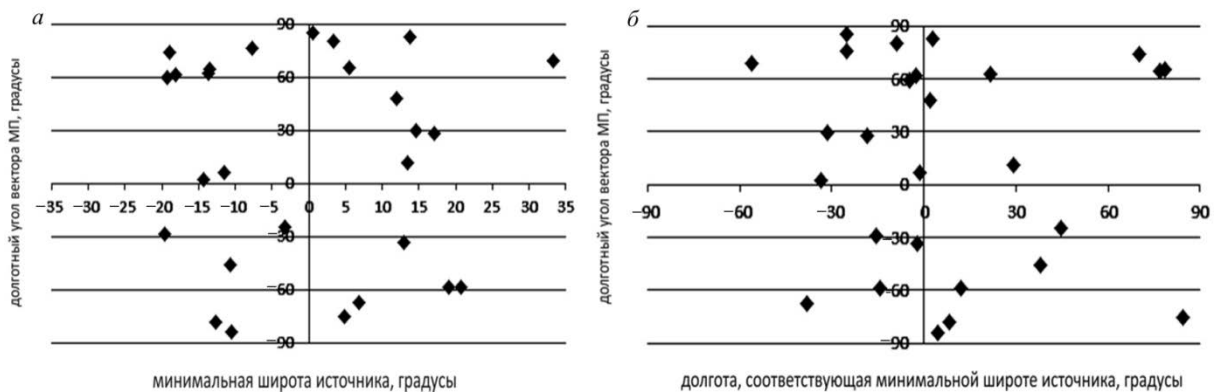


Рис. 12. Распределение долготного угла вектора МП в зависимости от широты источника (а) и долготы, соответствующей минимальной широте источника (б)

2.7. Долготный (азимутальный) угол вектора МП МО

Распределения долготного угла вектора МП МО в зависимости от минимальной широты протяженного солнечного источника и соответствующей ей долготы показывает максимум модуля долготного угла вектора МП МО в районе гелиографического экватора (рис. 12, а) и максимум в районе полуденного меридиана (рис. 12, б). Заметно, что с ростом солнечной широты и долготы долготный угол уменьшается. Для северного полушария (северо-востока и северо-запада) зависимости более выражены, чем для южного.

3. АНАЛИЗ СВЯЗИ ПАРАМЕТРОВ СОЛНЕЧНЫХ ИСТОЧНИКОВ КВМ С ГЕОМАГНИТНОЙ АКТИВНОСТЬЮ МАГНИТОСФЕРНЫХ СУББУРЬ

КВМ, являющийся проявлением солнечной активности, при воздействии на земную магнитосферу вызывает глобальную геомагнитную бурю, сопровождаемую изолированными магнитосферными суббурями или сериями суббурь. Поэтому представляется правильным связать параметры солнечных источников с интенсивностью магнитосферных суббурь, которую мы будем характеризовать усилением западного электроджета, описываемого индексом AL .

3.1. Зависимости экстремума индекса AL от минимальной широты солнечного источника и от соответствующей ей долготы, имеющей место при взаимодействии тела МО с земной магнитосферой

Зависимость экстремума индекса AL от минимальной широты солнечного источника показывает увеличение наблюдаемых экстремумов индекса AL с приближением солнечного источника к экватору (рис. 13). Это характеризуется коэффициентом корреляции ~ -0.6 в основном для южного солнечного полушария с минимумом в районе гелиографического экватора и отсутствием суббурь, имеющих отношение к источникам с минимальными широтами больше 20° . Для северо-запада также обнаруживается подобная зависимость ($R \sim -0.6$) с увеличением экстремумов при приближении к экватору, т. е. при уменьшении широт. Однако эта зависимость меняется для северо-востока, переходя в слабую прямую зависимость.

3.2. Зависимость экстремума индекса AL от минимальной широты и соответствующей ей долготы источника при прохождении турбулентной оболочки МО

Для источников, находящихся в южном полушарии, наблюдается зависимость экстремума индекса AL от минимальной широты с коэффициентом корреляции

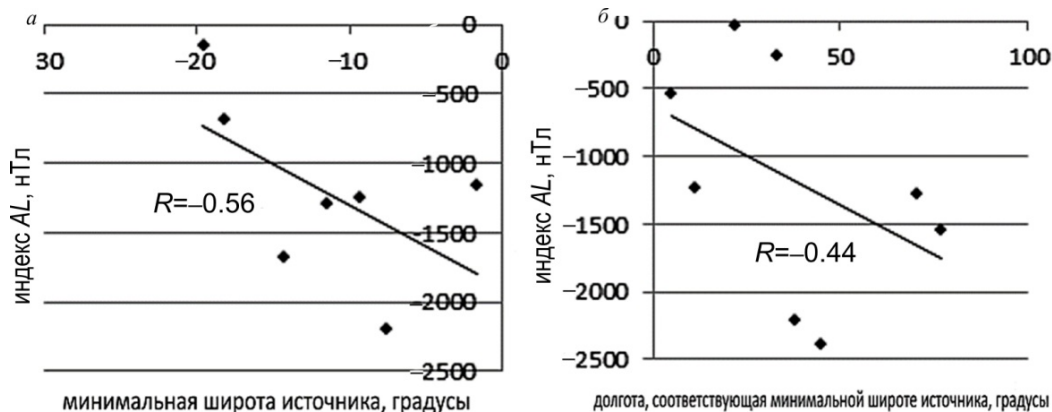


Рис. 13. Зависимость экстремума индекса AL от минимальной широты солнечного источника (а) и зависимость индекса AL от долготы солнечного источника, соответствующей минимальной широте источника при прохождении тела МО (б)

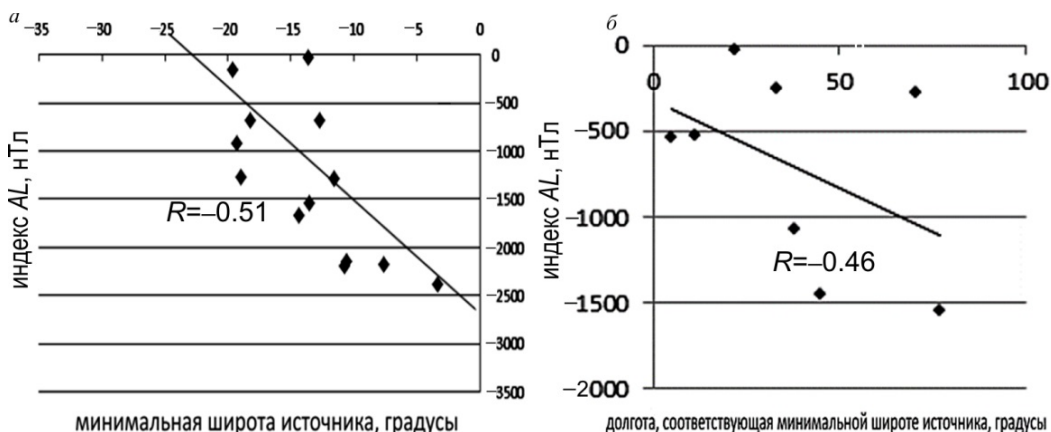


Рис. 14. Зависимость экстремума индекса AL от минимальной широты солнечного источника (а) и зависимость индекса AL от долготы солнечного источника, соответствующей минимальной широте источника при прохождении ТО МО (б)

ляции до -0.5 . Для северных широт возможна слабая обратная зависимость (рис. 14).

Для северо-востока обратная зависимость индекса AL от долготы практически не наблюдается. Для северо-запада прямая зависимость проявлена более отчетливо (~ 0.5). Для западного полушария в целом наблюдается слабая прямая зависимость.

Сопоставление результатов разделов 2 и 3 говорит о том, что суббуревые эффективности облаков и их оболочек сопоставимы и определяются расположением солнечных источников аналогичным образом.

ВЫВОДЫ

Выполнено статистическое исследование зависимостей характеристик корональных выбросов массы типа МО и уровня геомагнитной активности от параметров локализации их источников на солнечном диске. При этом решены основные проблемы обнаружения источников КВМ/МО и переноса соответствующих структур в солнечном ветре.

1. Источники КВМ часто не выделяются на фоне короны или фотосферы, однако в этом случае они могут быть определены по остаточным явлениям.

2. Уединенное МО — исключительно редкое явление, и его трудно обнаруживаемый на фоне возмущенной солнечной короны или фотосферы источник может быть установлен по наблюдению тела КВМ в виде диффузного облака, уносимого с Солнца

при эрупции вместе с вмороженным корональным магнитным полем. Тела КВМ хорошо видны на коронографах, и это обстоятельство позволяет определить их источник на солнечном диске и далее легко идентифицировать на патрульных КА. В случае таких КВМ в них включены и МО, поэтому и источник МО также может быть определен.

3. Прямое прохождение уединенных МО к Земле фиксируется коронографами только в профиль.

4. Огромные размеры МО позволяют по данным патрульных спутников получать параметры структуры и ее динамику только на сечении объекта. Поскольку для облаков нами принята успешно применяемая во многих исследованиях цилиндрическая бессловая модель, то динамику параметров на сечении сложно сформированной огромной псевдоцилиндрической конструкции мы интерполируем на все облако.

Изучены особенности распределения солнечных источников различной протяженности и угловой ориентации их видимой части в зависимости от координат источников. Установлено, что протяженные источники, имеющие небольшой наклон к солнечному экватору и находящиеся на краях солнечного диска, в отличие от непротяженных и сильно наклоненных, имеют шанс сгенерировать расширяющиеся облака, которые с высокой вероятностью могут достигнуть магнитосферы, как и облака от источника вблизи нулевого меридиана и низких широт.

Установлены закономерности зависимостей магнитных и ориентационных характеристик МО, зарегистрированных на КА, от локализации и пространственных параметров их источников на солнечном диске. Следует заметить, что в ряде случаев рассматриваемые зависимости по некоторым квадрантам солнечного диска отсутствуют или не установлены. В этом нет ничего удивительного, поскольку точное отождествление источников солнечной активности со структурами МО, проходящими через патрульные КА, затруднено по причинам, упомянутым во введении. Тем не менее нами исследованы зависимости скорости МО от минимальной широты источника и соответствующей ей долготы, максимальной напряженности магнитного поля МО от минимальной широты источника и соответствующей ей долготы, модуля B_z -компоненты максимальной напряженности МП МО от минимальной широты источника и соответствующей ей долготы, широтного и долготного углов в солнечно-эклиптической системе координат для вектора МП МО от минимальной широты источника и соответствующей ей долготы, а также определены их характерные особенности (см. разделы 2 и 3). Выявлено также увеличение числа высокоскоростных МО, привязанных к восточной части солнечного диска, и числа медленных МО, привязанных к западной части, что отражает последствия спирального движения потока солнечного ветра. Установлено, что для большой группы МО имеется зависимость их максимального магнитного поля от координат источника. Максимальная напряженность МП МО растет с увеличением северных и южных широт, начиная от экватора, что согласуется с наиболее вероятным распределением магнитоактивных областей на солнечном диске. Это же справедливо и для B_z -компоненты МП.

Анализ ориентации магнитных облаков, рассматриваемых в рамках цилиндрической модели, продемонстрировал наиболее вероятное формирование облаков, лежащих вблизи плоскости эклиптики, источниками, находящимися на низких широтах.

Исследована также зависимость экстремальных значений суббуревой активности (по индексу AL) от параметров солнечных источников МО в интервалы воздействия на земную магнитосферу структур МО (тела и оболочки). Отмечено отсутствие суббурь, ассоциированных с протяженными источниками вне диапазона гелиоширот $\sim 5\text{--}20^\circ$. Таким образом, установлены связи координат солнечного источника с геомагнитной активностью как оболочки, так и тела МО. Они согласуются с наиболее вероятным распределением магнитоактивных областей на солнечном диске.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-35-00430 (Бархатова О.М., Ревунова Е.А., Романов Р.В.) и Госзадания Минобрнауки РФ № 5.5898.2017/8.9 (Бархатов Н.А., Ревунов С.Е.).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Бархатов Н.А., Калинина Е.А. Определение параметров магнитных облаков и прогноз интенсивности магнитных бурь // Геомагнетизм и аэрономия. 2010. Т. 50, № 4. С. 477–485.

Бархатов Н.А., Калинина Е.А., Левитин А.Е. Проявление конфигураций магнитных облаков солнечного ветра в геомагнитной активности // Косм. иссл. 2009. Т. 47, № 4. С. 300–310.

Бархатов Н.А., Виноградов А.Б., Ревунова Е.А. Проявление ориентации магнитных облаков солнечного ветра в сезонной вариации геомагнитной активности // Косм. иссл. 2014а. Т. 52, № 4. С. 286–295. DOI: [10.7868/80023420614040025](https://doi.org/10.7868/80023420614040025).

Бархатов Н.А., Левитин А.Е., Ревунова Е.А. Классификация комплексов космической погоды с учетом типа солнечного источника, характеристик плазменного потока и создаваемого им геомагнитного возмущения // Геомагнетизм и аэрономия. 2014б. Т. 54, № 2. С. 185–191. DOI: [10.7868/S0016794014020035](https://doi.org/10.7868/S0016794014020035).

Бархатов Н.А., Ревунов С.Е., Воробьев В.Г., Ягодкина О.И. Проявление динамики параметров солнечного ветра на формирование суббуревой активности // Геомагнетизм и аэрономия. 2017. Т. 57, № 3. С. 273–279. DOI: [10.7868/S0016794017030026](https://doi.org/10.7868/S0016794017030026).

Бархатов Н.А., Ревунов С.Е., Воробьев В.Г., Ягодкина О.И. Исследование взаимосвязи высокоширотной геомагнитной активности с параметрами межпланетных магнитных облаков с использованием искусственных нейронных сетей // Геомагнетизм и аэрономия. 2018. Т. 58, № 2. С. 155–162. DOI: [10.7868/S0016794018020013](https://doi.org/10.7868/S0016794018020013).

Бархатова О.М., Косолапова Н.В., Бархатов Н.А., Ревунов С.Е. Событие синхронных возмущений в ионосфере и геомагнитном поле над станцией Казань // Солнечно-земная физика. 2017. Т. 3, № 4. С. 63–73. DOI: [10.12737/szf-34201706](https://doi.org/10.12737/szf-34201706).

Иванов К.Г. Солнечные источники потоков межпланетной плазмы на орбите Земли // Геомагнетизм и аэрономия. 1996. Т. 36. С. 19.

Манакова Ю.В., Пехтелева К.А., Бархатов Н.А., Ревунов С.Е. Пространственно-временной анализ возмущений диапазона Pc4-5 в периоды магнитных бурь корреляционно-скелетонным методом // Вестник Мининского университета. 2016. № 1. С. 1–6.

Николаева Н.С., Ермолаев Ю.И., Лодкина И.Г. Зависимость геомагнитной активности во время магнитных бурь от параметров солнечного ветра для разных типов течений // Геомагнетизм и аэрономия. 2011. Т. 51, № 1. С. 51–67.

Рязанцева М.О., Далин П.А., Застенкер Г.Н. и др. Свойства резких и больших скачков потока ионов (плотности) солнечного ветра // Косм. иссл. 2003. Т. 41, № 4. С. 405–416.

Burlaga L.F., Wang C., Richardson J.D., Ness N.F. Evolution of the multiscale statistical properties of corotating streams from 1 to 95 AU // J. Geophys. Res. 2003. V. 108, N A7. P. 1305–1310. DOI: [10.1029/2003JA009841](https://doi.org/10.1029/2003JA009841).

Hundhausen A.J. Coronal mass ejections // The many faces of the Sun: A summary of the results from NASA's Solar maximum mission. N.Y. Springer, 1999. 143 p.

Kilpua E.K.J., Lee C.O., Luhmann J.G., Li Y. Interplanetary coronal mass ejections in the near-Earth solar wind during the minimum periods following solar cycles 22 and 23 // Ann. Geophys. 2011. V. 29. P. 1455–1467. DOI: [10.5194/angeo-29-1455-2011](https://doi.org/10.5194/angeo-29-1455-2011).

Kilpua E.K.J., Li Y., Luhmann J.G., et al. On the relationship between magnetic cloud field polarity and geoeffectiveness // Ann. Geophys. 2012. V. 30. P. 1037–1050. DOI: [10.5194/angeo-30-1037-2012](https://doi.org/10.5194/angeo-30-1037-2012).

Liu Y., Manchester IV W.B., Richardson J.D., et al. Deflection flows ahead of ICMEs as an indicator of curvature and geoeffectiveness // J. Geophys. Res. 2008. V. 113, iss. A9, CitelID A00B03. DOI: [10.1029/2007JA012996](https://doi.org/10.1029/2007JA012996).

Neugebauer M., Liewer P.C. Creation and destruction of transitory coronal holes and their fast solar wind streams // J. Geophys. Res. 2003. V. 108, N A1. P. 1013–1016. DOI: [10.1029/2002JA009326](https://doi.org/10.1029/2002JA009326).

Wang Yuming, Chen Caixia, Gui Bin, et al. Statistical study of coronal mass ejection source locations: Understanding CMEs viewed in coronagraphs // *J. Geophys. Res.* 2011. V. 116, iss. A4. CiteID A04104. DOI: [10.1029/2010JA016101](https://doi.org/10.1029/2010JA016101).

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.* 2002. V. 107, N A10. P. 1314–1321. DOI: [10.1029/2001JA000161](https://doi.org/10.1029/2001JA000161).

URL: <http://lasco-www.nrl.na-vy.mil/index.php?p=content/cmelist> (дата обращения 6 мая 2019).

URL: https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list (дата обращения 6 мая 2019).

URL: <http://umtof.umd.edu/sem> (дата обращения 6 мая 2019).

URL: ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/STP/SOLAR_DATA (дата обращения 6 мая 2019).

URL: <http://vso.nso.edu/cgi/catalogue> (дата обращения 6 мая 2019).

REFERENCES

Barkhatov N.A., Kalinina E.A. Determination of magnetic cloud parameters and prediction of magnetic storm intensity. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2010, vol. 50, no. 4, pp. 453–460. DOI: [10.1134/S0016793210040043](https://doi.org/10.1134/S0016793210040043).

Barkhatov N.A., Kalinina E.A., Levitin A.E. Manifestation of configurations of magnetic clouds of the solar wind in geomagnetic activity. *Cosmic Res.* 2009, vol. 47, no. 4, pp. 268–278.

Barkhatov N.A., Revunova E.A., Vinogradov A.B. Effect of orientation of the solar wind magnetic clouds on the seasonal variation of geomagnetic activity. *Cosmic Res.* 2014a, vol. 52, no. 4, pp. 269–277. DOI: [10.1134/S0010952514040017](https://doi.org/10.1134/S0010952514040017).

Barkhatov N.A., Revunova E.A., Levitin A.E. Classification of space-weather complexes based on solar source type, characteristics of plasma flow, and geomagnetic perturbation induced by it. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2014b, vol. 54, no. 2, pp. 173–179. DOI: [10.1134/S0016793214020030](https://doi.org/10.1134/S0016793214020030).

Barkhatov N.A., Vorobjev V.G., Revunov S.E., Yagodkina O.I. Effect of solar dynamics parameters on the formation of substorm activity. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2017, vol. 57, iss. 3, pp. 251–256. DOI: [10.1134/S0016793217030021](https://doi.org/10.1134/S0016793217030021).

Barkhatov N.A., Revunov S.E., Vorobjev V.G., Yagodkina O.I. Studying the relationship between high-latitude geomagnetic activity and parameters of interplanetary magnetic clouds with the use of artificial neural networks. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2018, vol. 58, iss. 2, pp. 147–153. DOI: [10.1134/S0016793218020020](https://doi.org/10.1134/S0016793218020020).

Barkhatova O.M., Kosolapova N.V., Barkhatov N.A., Revunov S.E. Synchronization of geomagnetic and ionospheric disturbances over Kazan station. *Solar-Terrestrial Physics*. 2017, vol. 3, iss. 4, pp. 58–66. DOI: [10.12737/stp-34201706](https://doi.org/10.12737/stp-34201706).

Burlaga L.F., Wang C., Richardson J.D., Ness N.F. Evolution of the multiscale statistical properties of corotating streams from 1 to 95 AU. *J. Geophys. Res.* 2003, vol. 108, no. A7, pp. 1305–1310. DOI: [10.1029/2003JA009841](https://doi.org/10.1029/2003JA009841).

Hundhausen A.J. Coronal mass ejections. *The many faces of the Sun: A summary of the results from NASA's Solar maximum mission*. N.Y. Springer, 1999. 143 p.

Ivanov K.G. Solar sources of interplanetary plasma flows in the Earth's orbit. *Geomagnetism and Aeronomy*. 1996, vol. 36, p. 19. (In Russian).

Kilpua E.K.J., Lee C.O., Luhmann J.G., Li Y. Interplanetary coronal mass ejections in the near-Earth solar wind during the minimum periods following solar cycles 22 and 23. *Ann. Geophys.* 2011, vol. 29, pp. 1455–1467. DOI: [10.5194/angeo-29-1455-2011](https://doi.org/10.5194/angeo-29-1455-2011).

Kilpua E.K.J., Li Y., Luhmann J.G., Jian L.K., Russell C.T. On the relationship between magnetic cloud field polarity and geoeffectiveness. *Ann. Geophys.* 2012, vol. 30, pp. 1037–1050. DOI: [10.5194/angeo-30-1037-2012](https://doi.org/10.5194/angeo-30-1037-2012).

Liu Y., Manchester IV W.B., Richardson J.D., Luhmann J.G., Lin R.P., Bale S.D. Deflection flows ahead of ICMs as an indicator of curvature and geoeffectiveness. *J. Geophys. Res.* 2008, vol. 113, iss. A9, CiteID A00B03. DOI: [10.1029/2007JA012996](https://doi.org/10.1029/2007JA012996).

Manakova Yu.V., Pekhteleva K.A., Barkhatov N.A., Revunov S.E. Space-time analysis of disturbances in the PC4-5 period range during magnetic storms by correlation-skeleton method. *Vestnik Miniskogo universiteta [Vestnik of Minin University]*. 2016, no. 1, pp. 1–6. (In Russian).

Neugebauer M., Liewer P.C. Creation and destruction of transitory coronal holes and their fast solar wind streams. *J. Geophys. Res.* 2003, vol. 108, no. A1, pp. 1013–1016. DOI: [10.1029/2002JA009326](https://doi.org/10.1029/2002JA009326).

Nikolaeva N.S., Yermolaev Y.I., Lodkina I.G. Dependence of geomagnetic activity during magnetic storms on the solar wind parameters for different types of streams. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2011, vol. 51, no. 1, pp. 49–65. DOI: [10.1134/S0016793211010099](https://doi.org/10.1134/S0016793211010099).

Riazantseva M.O., Dalin P.A., Zastenker G.N., Parhomov V.A., Eselevich V.G., Eselevich M.V., Richardson J. Properties of sharp and large changes in the ion flux (density) of the solar wind. *Cosmic Res.* 2003, vol. 41, no. 4, pp. 371–381.

Wang Yuming, Chen Caixia, Gui Bin, Shen Chenglong, Ye Pinzhong, Wang S. Statistical study of coronal mass ejection source locations: Understanding CMEs viewed in coronagraphs. *J. Geophys. Res.* 2011, vol. 116, iss. A4, CiteID A04104. DOI: [10.1029/2010JA016101](https://doi.org/10.1029/2010JA016101).

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.* 2002, vol. 107, no. A10, pp. 1314–1321. DOI: [10.1029/2001JA000161](https://doi.org/10.1029/2001JA000161).

URL: <http://lasco-www.nrl.na-vy.mil/index.php?p=content/cmelist> (accessed May 6, 2019).

URL: https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list (accessed May 6, 2019).

URL: <http://umtof.umd.edu/sem> (accessed May 6, 2019).

URL: ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/STP/SOLAR_DATA (accessed May 6, 2019).

URL: <http://vso.nso.edu/cgi/catalogue> (accessed May 6, 2019).

Как цитировать эту статью:

Бархатов Н.А., Ревунова Е.А., Романов Р.В., Бархатова О.М., Ревунов С.Е. Исследование связи параметров локализации солнечных источников магнитных облаков с их характеристиками и суббуревой активностью. *Солнечно-земная физика*. 2019. Т. 5, № 3. С. 70–80. DOI: [10.12737/szf-53201907](https://doi.org/10.12737/szf-53201907).