

К ВОПРОСУ О ЛОКАЛИЗАЦИИ МЕСТ РОЖДЕНИЯ КВМ НА СОЛНЦЕ

© 2023 г. С. А. Язев^{1,2,*}, В. М. Томозов²

¹Иркутский государственный университет, Иркутск, Россия

²Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия

*E-mail: syazev@gmail.com

Поступила в редакцию 05.03.2023 г.

После доработки 19.05.2023 г.

Принята к публикации 17.07.2023 г.

Исследована локализация зон возникновения КВМ на Солнце в период с ноября 2006 по февраль 2007 г. по каталогу SOHO. Описан метод сопоставления таких зон с активными областями (АО) как на видимом, так и на невидимом полушариях Солнца. Показано, что простое линейное продолжение проекций траектории движения КВМ на Солнце во многих случаях проходит мимо АО. 63.5% КВМ удалось привязать к АО, 19% — не удалось, а для 17.5% должен быть сделан выбор между АО и факельными площадками, где пятна наблюдались на 1–3 оборота Солнца раньше. Обсуждается гипотеза, что смещение начала траектории движения КВМ от центроида АО связано с несимметричностью расположения магнитного жгута, на основе которого формируется КВМ, относительно АО: одно основание жгута находится вблизи сильных магнитных полей пятен, второе — в области слабых полей на периферии или за пределами АО.

Ключевые слова: корональные выбросы массы, активные области, пятна на Солнце

DOI: 10.31857/S0004629923100080, **EDN:** STHYAG

1. ВВЕДЕНИЕ

Корональные выбросы массы (КВМ) являются наиболее энергичными явлениями на Солнце (помимо сильных солнечных вспышек) и в настоящее время считаются основным фактором, воздействующим на космическую погоду в окрестностях Земли. КВМ были обнаружены в 70-х годах прошлого века американской внеатмосферной обсерваторией OSO-7 и затем интенсивно изучались с помощью коронографов, установленных на космических аппаратах (Skylab, SMM, SOHO и др.) [1]. Масса КВМ достигает 1.5×10^{12} кг, размеры превышают радиус Солнца, а скорости наиболее быстрых из них могут достигать значений ~ 3000 км/с [2]. В то же время существуют выбросы и значительно меньших масштабов, вплоть до эрупций мини-волокон.

Исторически, однако, первыми были обнаружены возмущения космической погоды (1700-е годы) по косвенным данным — солнечным пятнам, полярным сияниям и геомагнитным бурям. Затем были открыты солнечные вспышки (XIX век) и явления, связанные с солнечными энергичными частицами (SPE, XX век). Только после изучения этих феноменов удалось объединить их в одно физически взаимосвязанное явление [1].

Мощные вспышечные явления, сопровождаемые КВМ, способны сильно возмущать магнито-

сферу Земли, порождая геомагнитные бури. Рентгеновское излучение сильных вспышек, в свою очередь, оказывает непосредственное влияние на ионосферу Земли, вызывая ионизацию ее верхних слоев, изменяя ее проводимость и приводя к другим сложным, в том числе и химическим, процессам.

В настоящее время феномен КВМ продолжает интенсивно изучаться с помощью космических аппаратов в целях прогнозирования прихода выбросов к Земле, поскольку изучение космической погоды представляет чрезвычайную важность как для наземного электронного оборудования и обеспечения качественной радиосвязи, так и для межпланетных космических полетов [3, 4].

Выявлена тесная взаимосвязь между КВМ и солнечными вспышками [5]. Наиболее сильные события (рентгеновские, протонные и гамма-вспышки) относятся к разряду самых мощных проявлений солнечной активности. Они происходят в сложных активных областях (АО) и практически всегда сопровождаются появлением ускоренных частиц в гелиосфере и формированием КВМ. По современным представлениям, одним из основных механизмов ускорения частиц в больших солнечных вспышках является выделение свободной магнитной энергии в токовых слоях в результате процесса магнитного пересоединения с последующим стохастическим ускорением.

ем частиц вследствие развития неустойчивостей плазмы [6]. Еще один механизм ускорения частиц во вспышках (особенно в протонных явлениях) связан с ускорением частиц на фронтах ударных волн, которые возникают, когда КВМ, покидая АО, распространяются в короне и межпланетной среде. К возникновению сильных вспышек и связанных с ними КВМ приводит нарушение равновесия магнитных структур в АО в процессе их эволюции. При непрерывном воздействии сдвиговых (и других) движений оснований магнитных петель вдоль нейтральных магнитных линий волокна (протуберанцы), расположенные над нейтральной линией, теряют устойчивость и поднимаются вверх с ускорением, приводя к открыванию магнитной структуры в АО и формируя ядро КВМ.

Проблема определения областей зарождения КВМ на Солнце возникла с момента их открытия и окончательно не решена до сих пор [1, 5, 7–9].

Кинематические характеристики КВМ во внутренней и внешней короне, несущие информацию о свойствах их источников, изучались в работе [10]. Области источников 59 изученных КВМ были отождествлены как АО, активные протуберанцы или области эрупции протуберанцев. Было также показано, что области источников КВМ оставляют своеобразные “отпечатки” в статистических корреляциях между разными кинематическими параметрами КВМ.

Подробно изучались области источников вспышек и КВМ в работе [11], в которой прослеживалась эволюция 19 выходящих из-за восточного лимба АО от их рождения до генерации первых больших вспышек или КВМ. Показано, что 11 КВМ образовались на так называемой столкновительной линии раздела полярностей (PIL) между близкими друг к другу магнитными биполями. Столкновения сопровождались сдвигами и гашениями магнитных потоков, развивающимися на PIL, причем в 84% случаев длина “области столкновения” превышала 18 Мм. Было найдено также, что балл вспышек положительно коррелирует с длиной участка активной PIL.

Таким образом, принято считать, что часть популяции КВМ связана с АО, тогда как другая часть — с эрупцией волокон [12]. Согласно данным [13], 85% КВМ связаны с АО, 15% — со спокойными областями и эрупцией волокон, 44% — с эрупцией волокон в АО (здесь следует оговориться, что статистика цитируемого исследования невелика — всего 32 события).

Сопоставление КВМ с сильными вспышками приводит к следующим выводам. Вероятность возникновения КВМ зависит от продолжительности связанной с ним вспышки: для вспышек, длящихся менее часа, такая вероятность равна 26%, для длительных вспышек (более 6 ч) — 100%

[14]. Поскольку сильные вспышки наблюдаются только в АО (преимущественно крупных), это лишний раз подчеркивает важную связь КВМ с АО. В пользу тезиса о важной связи АО и КВМ говорит и корреляция числа солнечных пятен с частотой генерации КВМ, а также тот факт, что КВМ, как правило, возникают в “королевской зоне” — в диапазоне широт менее 45° [8].

С другой стороны, в период максимума цикла отмечаются и более высокоширотные КВМ (где гарантированно не формируются АО). Кроме того, статистика показывает, что среднюю частоту генерации КВМ на Солнце можно оценить в пределах 1.5–2.1 событий в сутки, хотя наблюдается и по 6 и более событий в день [7, 8]. Но генерация КВМ не прекращается (хотя и спадает) даже в минимуме цикла, — в том числе и тогда, когда пятна не наблюдаются совсем [8, 9]. Этот факт свидетельствует в пользу утверждения о том, что КВМ возникают (в том числе) и в областях без пятен. Впечатляющие примеры порождающей КВМ эрупции диффузных протуберанцев, расположенных вдали от АО, приведены, например, в монографии Филиппова [9].

В рамках другого подхода классификация КВМ строится на их принадлежности к тому или иному типу структур в короне (выделяемых на уровне поверхности источника) — вдоль пояса корональных стримеров либо вблизи цепочек стримеров. Различие состоит в топологии поля — как известно, цепочки стримеров разделяют области с одинаковой магнитной полярностью, тогда как пояс корональных стримеров лежит между областями разной полярности. Установлено, что эти типы КВМ различаются по типичным скоростям и углам раскрытия [15]. Показано, кроме того, что места возникновения КВМ тяготеют к нейтральной линии магнитного поля на поверхности источника [16]. Многие авторы отмечают также, что КВМ рождаются вблизи нейтральных линий на уровне фотосферы, что естественно, поскольку основой КВМ является магнитный жгут (арка), чьи основания закреплены в областях с различными магнитными полярностями. Кроме того, протуберанцы (включая эруптивные), также располагаются над нейтральными линиями.

Настоящая работа посвящена изучению вопроса о локализации мест возникновения 345 КВМ, наблюдавшихся в период с ноября 2006 по февраль 2007 г. В этот период на фазе спада 23 цикла солнечной активности было сравнительно немного АО, что упростило проведение анализа. С другой стороны, в это же время на Солнце развивался уникальный комплекс активности (КА), вызвавший большой интерес исследователей (см., например, [17, 18]).

First C2 Appearance Date Time [UT]		Central PA [deg]	Angular Width [deg]	Linear Speed [km/s]	2nd-order Speed at final height [km/s]	2nd-order Speed at 20 Rs [km/s]	Accel [m/s ²]	Mass [gram]	Kinetic Energy [erg]	MPA [deg]	Daily Movies and Plots	Remarks
2006/12/02	05:12:04	117	28	206	231	672	17.3 ⁻¹	----	----	117	C2 C3 PHTX DST Java Movie	Very Poor Event; Only C2
2006/12/02	06:12:04	287	38	512	737	2227	205.5 ⁻¹	----	----	287	C2 C3 PHTX DST Java Movie	Only C2
2006/12/02	07:12:04	82	46	131	29	0	-61.4 ⁻¹	----	----	91	C2 C3 PHTX DST Java Movie	Very Poor Event; Only C2
2006/12/03	06:48:04	108	34	360	341	0	-13.0 ⁻¹	----	----	106	C2 PHTX DST Java Movie	Poor Event; Only C2
2006/12/04	04:36:05	104	54	574	480	0	-61.7 ⁻¹	----	----	94	C2 PHTX DST Java Movie	Only C2

Рис. 1. Фрагмент каталога КВМ по данным коронографов LASCO космического аппарата SOHO.

2. МЕТОДИКА

Данные о КВМ были взяты из каталога [19].

На рис. 1. приведен фрагмент указанного каталога.

Использована авторская компьютерная программа “Солнцеворот” [20], позволяющая произвольно вращать трехмерную виртуальную каркас-сферу с нанесенным на нее изображением Солнца (фотосферным снимком, магнитограммой либо фильтрограммой), и проецировать на нее продолжение траекторий КВМ до пересечения с предполагаемым источником. Для определения направления траекторий движения КВМ использовались данные, полученные на космическом аппарате SOHO [19] (см. столбец 3 в таблице на рис. 1).

Методика локализации мест генерации КВМ сводилась к следующему. Для КВМ, происходивших во время сильных вспышек в упомянутом выше КА, локализация КВМ считалась очевидной. Во всех остальных случаях на изображение магнитограммы Солнца, нанесенное на каркас-сферу, проецировалось продолжение траектории движения КВМ, определенной по данным о позиционных углах проекций КВМ на картинную плоскость из упомянутого выше каталога. Проекция траектории выглядела как обруч, надетый на сферу (рис. 2).

Если вблизи продолжения траектории КВМ на диске Солнца (в пределах до 3–5 гелиографических градусов) оказывалась область сильных магнитных полей АО, то принималась гипотеза о том, что КВМ сформировался в данной АО. При неоднозначности выбора учитывалось возможное влияние эффекта проекции: как правило, углы раскрытия КВМ (их значения взяты в каталоге SOHO, столбец 4 на рис. 1) оказываются больше в тех случаях, когда источник находится ближе к центру диска, чем в случае генерации выброса вблизи лимбов. Кроме того, учитывалась возможность того, что на первом этапе распространения в нижней короне выброс может двигаться с отклонением от радиального направления. Это обстоятельство увеличивает дисперсию при определении места образования КВМ по данным о направлении его движения в верхней короне, полученным по изображениям с коронографов SOHO. Кроме того, учитывалось, что изменение направления движения КВМ в ходе распространения в нижней гелиосфере воздействует на видимые форму и угловые размеры выброса, наблюдаемого в картинной плоскости.

Статистика проанализированного набора КВМ говорит о том, что в ряде случаев (но далеко не всегда) источники сильных магнитных полей АО оказывались точно на продолжении оси КВМ. В таких ситуациях формулировался вывод о том, что КВМ сформировался непосредственно

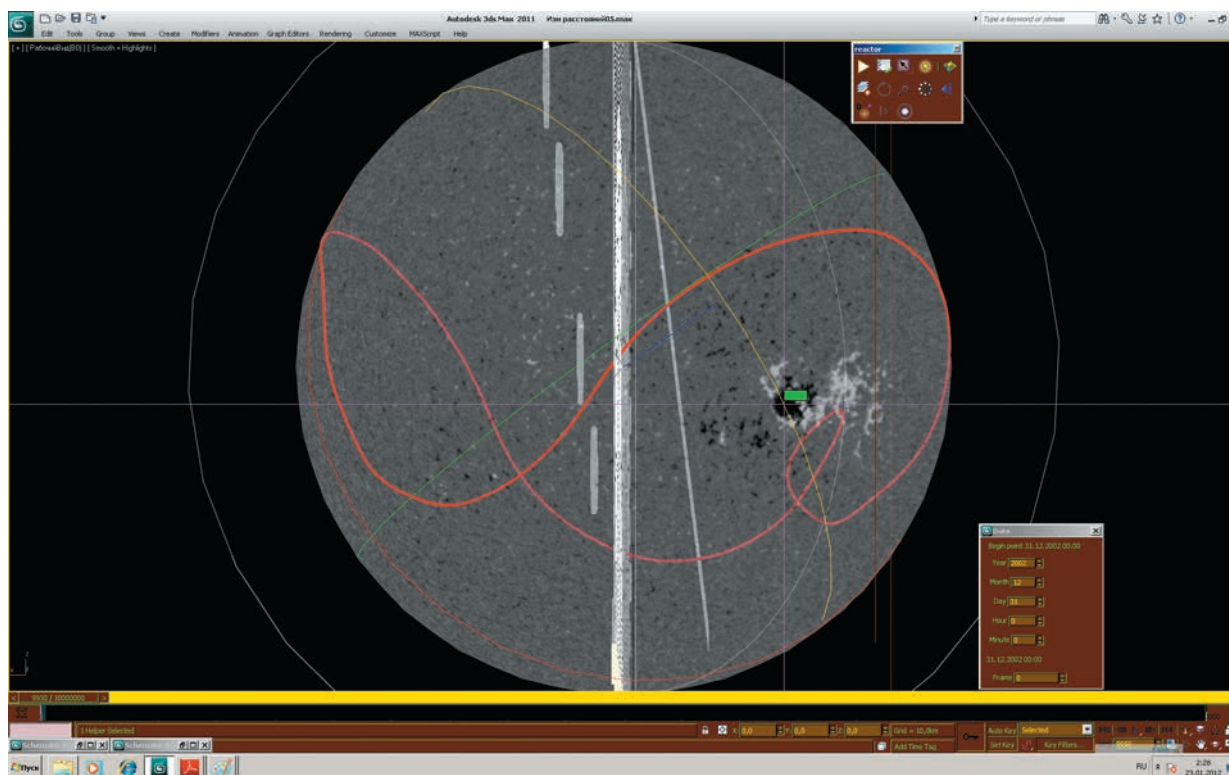


Рис. 2. Скриншот интерфейса программы “Солнцеворот”. Используется текстура магнитограммы Солнца, красная линия — проекция оси КВМ на солнечную поверхность.

в области пятен или флоккулов (факельных площадок) конкретной АО. Однако такими случаями ситуация не исчерпывалась.

Напротив, продолжение проекции траектории КВМ часто проходило с заметными отклонениями (как правило, более десяти гелиографических градусов) от АО. По магнитограммам SOHO была выявлена связь таких отклонений с геометрией взаимного расположения магнитных полюсов друг относительно друга, а также относительно направления траектории движения КВМ. Кроме того, было выявлено влияние угла наклона петельных структур, предположительно порождающих КВМ, к поверхности Солнца по изображениям верхней короны, полученным инструментами SOHO. Исходя из гипотезы о том, что развитие КВМ происходит в форме раздувающейся магнитной арки, в общем случае изначально наклоненной к поверхности Солнца, производились расчет и привязка предполагаемого источника КВМ к координатам оснований таких петель в гелиографической системе координат. Чем больше оказывался наклон магнитных арок в АО, предположительно порождавшей КВМ, к локальной поверхности Солнца, а также чем больше была длина петель в этой АО, тем на большем расстоянии от предполагаемого источника собы-

тия оказывалась проекция траектории КВМ на каркас-сфере.

Важным фактором при решении вопроса о локализации мест генерации КВМ оказались также топология и ориентация петель в АО. Таким образом, если учитывать только случаи с “идеальным” пересечением АО и продолжения траектории КВМ, локализация места события во многих случаях оказалась бы затруднена.

Был выполнен анализ возможных вариантов областей генерации КВМ как на видимом, так и на невидимом полушариях Солнца, поскольку коронографы SOHO демонстрируют движение КВМ в картинной плоскости, а сам диск Солнца вплоть до нижней короны закрыт маской коронографа, и изначально (за редкими исключениями сильных вспышек) неизвестно, на видимом или невидимом полушарии Солнца возник КВМ. Для изучения ситуации на невидимом полушарии Солнца использовались изображения, полученные за неделю до либо через неделю после даты наблюдения КВМ, что позволяло восстанавливать всю поверхность Солнца и анализировать объекты, находившиеся в момент генерации КВМ на продолжении оси движения выброса на невидимом полушарии с естественной оговоркой о влиянии фактора эволюции АО.

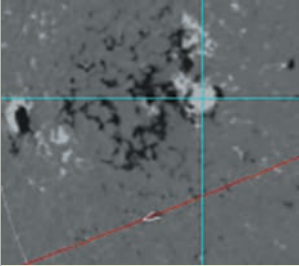
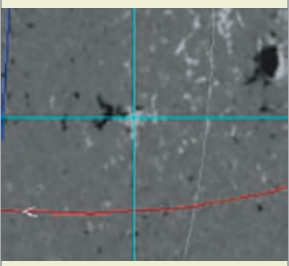
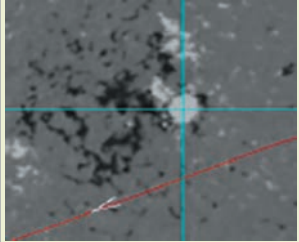
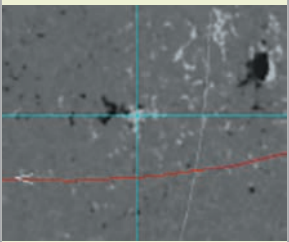
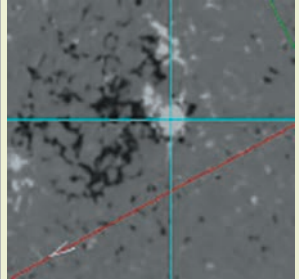
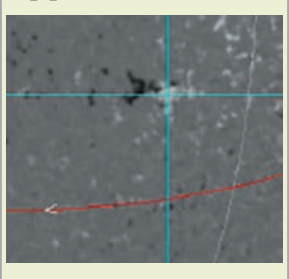
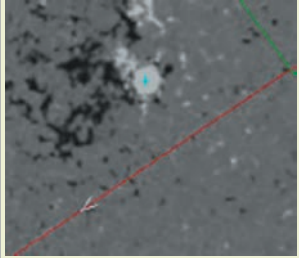
Дата и Время События КВМ [UT]	Направ- ление КВМ [deg]	Угловая Ширина КВМ [deg]	Долгота источни- ка I- вар.	Широта источника I-вар.	Увеличенное изображение области источника КВМ	Долгота источни- ка II- вар.	Широта источника II-вар.	Увеличенное изображение области источника КВМ II-вар
2007/01/03 15:30:05	245	17	35.42	-4.51	Лицевая сторона 2007_01_03 16:03 	349.55	-14.24	Лицевая сторона 2007_01_10 16:00 
2007/01/03 23:06:04	247	23	35.42	-4.51	Лицевая сторона 2007_01_04 00:03 	349.55	-14.24	Лицевая сторона 2007_01_10 16:00 
2007/01/04 09:30:04	242	24	35.42	-4.51	Лицевая сторона 2007_01_04 09:39 	349.55	-14.24	Лицевая сторона 2007_01_10 16:00 
2007/01/04 12:54:04	235	29	35.42	-4.51	Лицевая сторона 2007_01_04 12:47 			

Рис. 3. Фрагмент рабочего каталога КВМ, содержащего области — кандидаты, возможно, генерировавшие данный КВМ.

Был составлен каталог всех наблюдавшихся в исследуемый период КВМ, дополненный изображениями фрагментов магнитограмм и снимков фотосферы, через которые проходило продолжение траектории КВМ (рис. 3).

В ряде случаев ситуация по-прежнему оставалась неоднозначной. Были выявлены случаи, когда продолжение проекции траектории КВМ проходило поблизости от двух АО, иногда расположенных в разных (видимом и невидимом) по-

Таблица 1. КВМ в январе 2006—феврале 2007 г.

	Число КВМ в АО	Число КВМ вне АО	Число КВМ либо в АО, либо вне АО	Общее число КВМ
Ноябрь 2006	86	7	1	94
Декабрь 2006	28	18	9	55
Январь 2007	73	18	19	110
Февраль 2007	32	23	31	86
Итого	219	66	60	345

Таблица 2. Связь КА с АО

	За 3 оборота	За 2 оборота	За 1 оборот	Одновременно с пятнами	Через 1 оборот	Через 2 оборота	Через 3 оборота
Число случаев	0	6	8	219	15	11	4

лушариях Солнца. Кроме того, имелись примеры, когда вблизи продолжения траектории КВМ на диске Солнца не наблюдалось ни одной группы пятен. В таких случаях по обе стороны от оси КВМ по магнитограммам Солнца осуществлялся поиск старых факельных площадок, где не было пятен, но присутствовали бы усиленные магнитные поля факелов. Когда удавалось найти такие области, с учетом этого и других указанных выше факторов принималось решение, что данная область без пятен является источником КВМ.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты приведены в табл. 1.

Всего 63.5% от общего числа КВМ в рассматриваемый период удалось однозначно привязать к группам пятен. Это означает, что проекции продолжений траекторий КВМ проходили точно через АО с пятнами либо вблизи их (ближе, чем в 10 гелиографических градусах), при этом альтернативные варианты не просматривались. Таких событий оказалось 219 (первый столбец таблицы).

Всего 19% от общего числа КВМ оказалось невозможным привязать к каким-либо группам пятен. Это означает, что проекции продолжений траекторий КВМ не пересекали никакие группы пятен и не проходили ближе, чем в 10 гелиографических градусах от них. В этих случаях привязка осуществлялась к магнитным полям АО без пятен, через которые, или вблизи которых проходили проекции продолжений траекторий КВМ (второй столбец таблицы, 66 случаев).

Кроме того, 17.5% от общего числа КВМ не допускали однозначной локализации: продолжение проекции траектории КВМ проходило одновременно и через АО, и через факельные площадки без пятен, аналогичные по структуре тем, для которых в других случаях решение о локализации

было принято. Данные о таких примерах приведены в третьем столбце табл. 1. Корректное решение о привязке таких КВМ к той или иной АО не могло быть обосновано. В реальности КВМ, содержащиеся в третьем столбце, должны пополнить либо первый, либо второй столбцы. Ввиду их относительно малочисленности (менее 18%, 60 случаев), они не должны существенно влиять на общую картину распределения.

На рис. 4 приведены распределения КВМ по углам раскрытия. На верхней панели представлены случаи, когда места формирования КВМ были отождествлены с группами пятен, на нижней панели — случаи, когда КВМ возникали в областях в отсутствие пятен.

Несмотря на то, что статистика невелика, усматривается тенденция к различиям в положениях максимумов распределений: КВМ, возникшие в АО, отличаются преимущественно большими углами раскрытия по сравнению с КВМ, которые формировались в областях без пятен. Это различие, с точки зрения авторов, является дополнительным доводом в пользу корректности применявшейся методики.

Рассмотрим подробнее полученные данные. Вполне обоснованной, с точки зрения авторов, выглядит гипотеза о том, что КВМ, локализованные в магнитных полях беспятенных АО, могли быть на самом деле связаны с полноценными АО, содержащими пятна, но существовавшими на тех же гелиографических координатах ранее. Для проверки этой гипотезы была рассмотрена эволюция беспятенных областей, где возникали КВМ, на три кэррингтоновских оборота вперед и на три оборота назад от оборота, когда наблюдался КВМ. Итоги приведены в табл. 2.

Из табл. 2 видно, что в подавляющем большинстве случаев КВМ связаны с АО на стадии существования в них пятен. В трех последних

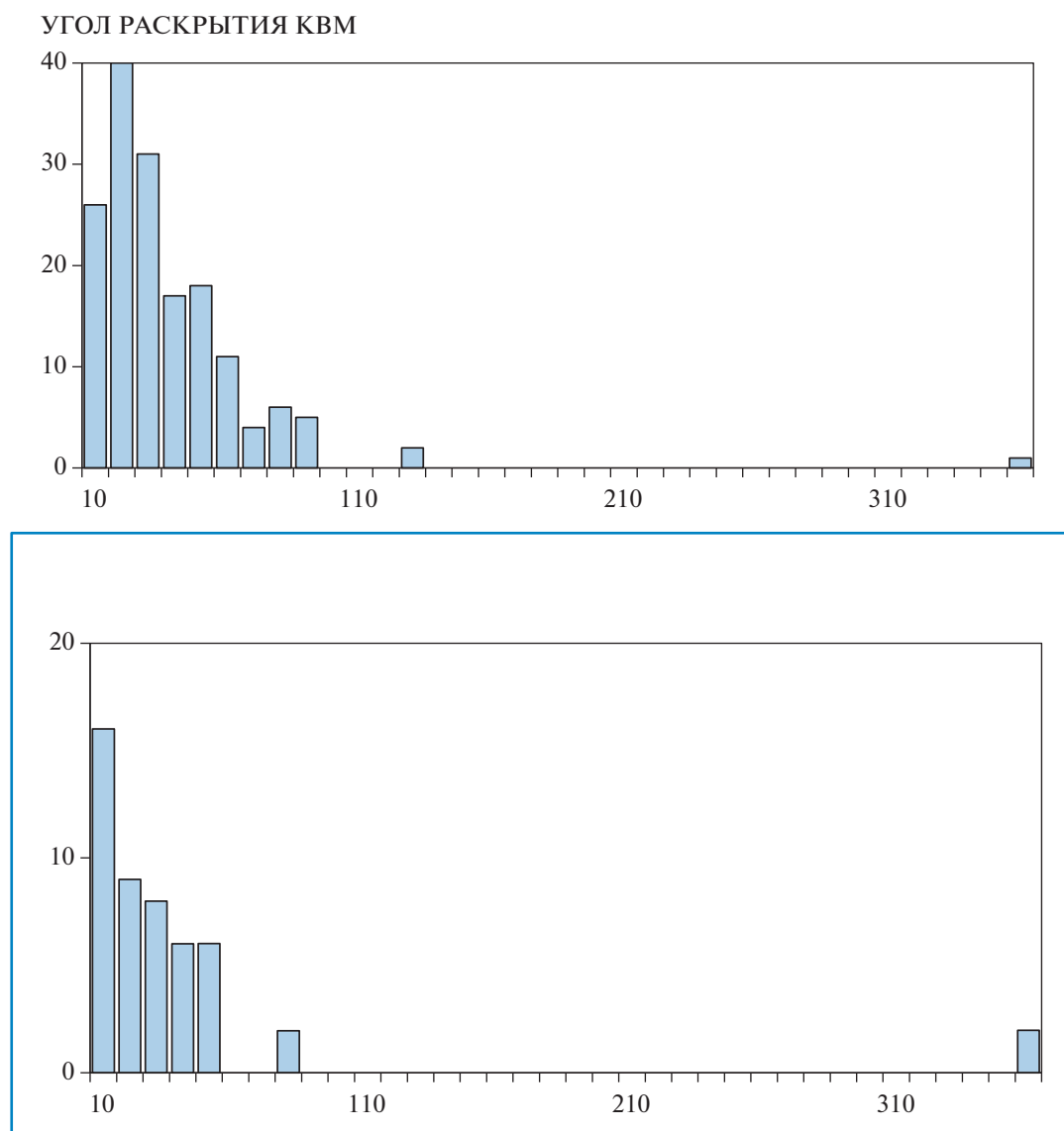


Рис. 4. Углы раскрытия для КВМ, локализованных в АО (вверху) и вне АО (внизу).

столбцах таблицы приведено число КВМ, возникших соответственно спустя 1, 2, 3 кэррингтоновских оборота после оборота, когда в АО существовали пятна, — в пределах факельной площадки, сохранившейся на месте исчезнувших пятен. Во втором, третьем и четвертом столбцах указано число КВМ, наблюдавшихся соответственно за 1, 2 и 3 оборота до появления пятен на этом месте. Видно, что АО, понимаемые в широком смысле, остаются предпочтительным местом для возникновения КВМ даже после исчезновения в них пятен. Способность генерировать КВМ остается у АО, постепенно спадая, на протяжении как минимум трех оборотов после исчезновения пятен. При этом соответственно уменьшаются поперечные градиенты магнитного поля на нейтральной линии и соответственно этому изменяется мор-

фология хромосферных образований на этой линии — от флоккулярного коридора и волокна АО к каналу волокна и диффузному волокну (протуберанцу) [21].

Интересными выглядят немногочисленные случаи, когда КВМ возникали за 1–2 солнечных оборота до появления пятен в АО (третий и четвертый столбцы табл. 2). Эта небольшая популяция КВМ потребовала дополнительного анализа. Выяснилось, что подобные случаи связаны на самом деле с остаточными магнитными полями старых АО, где спустя оборот или два происходит повторный выход магнитного потока в виде пятен и факелов новой АО. Если это так, то подобные случаи из третьего и четвертого столбца должны быть перенесены в последние столбцы

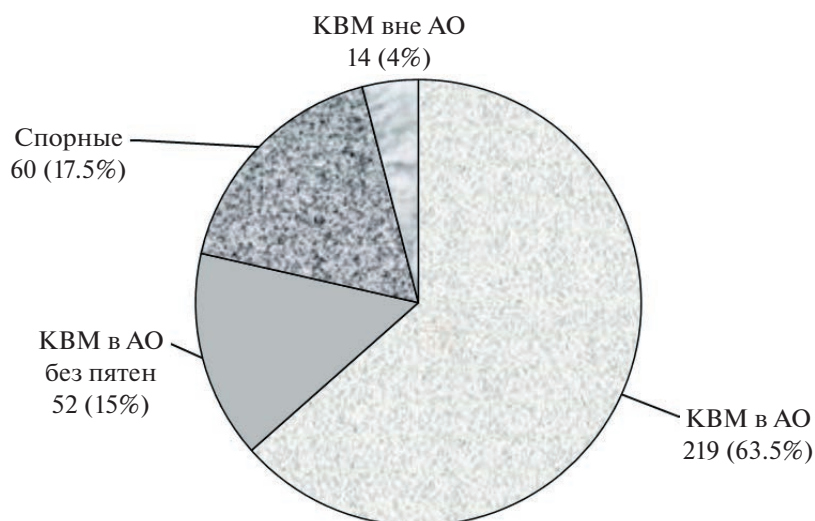


Рис. 5. Распределение КВМ по типу связи с АО.

таблицы, поскольку здесь, очевидно, основную роль играют остаточные магнитные поля ранее существовавшей АО, а не еще не наблюдаемые. Это означает, что обоснованным является рассмотрение связи КВМ с ранее исчезнувшей на этом месте АО, а не с АО, которой еще предстоит сформироваться в будущем, что выглядит вполне естественным.

Таким образом, те КВМ, которые были первоначально идентифицированы, как не связанные с АО, в действительности оказались в определенном смысле все-таки связанными с ними: подавляющее большинство таких событий происходит в АО, хотя и после исчезновения здесь пятен. Результаты итогового анализа приведены на рис. 5.

К 219 (63.5% от общего числа) уверенно определенных случаев связи КВМ с пятненными АО следует добавить 52 (15%) случая связи с беспятненными АО (рис. 5), поскольку большинство таких случаев из третьего столбца табл. 1 в действительности оказались все-таки связанными с пятненными АО, но находившимися здесь в предыдущих оборотах (эффект последействия). Таким образом, с АО (пятненными или уже беспятненными) оказались связаны 78.5% всех КВМ за рассматриваемый период. Если в табл. 1 (второй столбец) указано, что 19% от общего числа КВМ не связаны с АО, то дополнительный анализ показал, что почти $\frac{3}{4}$ от этой популяции событий (15 из 19%) возникли на беспятненных факельных площадках старых распадающихся АО, где пятна наблюдались 1–3 кэррингтоновских оборота назад.

“Спорные” 60 КВМ (17.5% от общего числа) остаются связанными либо с пятненными, либо беспятненными АО, и имеющейся информации не хватает, чтобы сделать окончательный вывод.

Тем не менее оставшиеся 4% от общего числа КВМ не обнаруживают связи с АО ни в каком смысле. Это означает, что продолжение проекции траектории КВМ на диске не проходит вблизи хотя бы старых (уже беспятненных) АО либо что АО здесь были, но более трех оборотов назад. Кроме того, могут сказываться ограничения методики, связанные с тем, что мы не наблюдаем одновременно всю поверхность Солнца, а изображения невидимого полушария Солнца, использовавшиеся для анализа, были неизбежно смещены на неделю относительно даты КВМ. Отметим также, что в настоящей работе не рассматривался вопрос о связи КВМ с эрупцией диффузных волокон за пределами АО. Не исключено, что этот фактор также имеет значение.

4. ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Связь КВМ со вспышками высоких рентгеновских классов выглядит очевидной и сомнений не вызывает. Анализ каталога сильных вспышек, порождающих на орбите Земли протоны с энергией выше 10 МэВ в потоке, превышающем 10 частиц в секунду на квадратный сантиметр [19], демонстрирует стопроцентную связь: подобные вспышки всегда сопровождаются КВМ. В частности, все 42 подобных события, зарегистрированных в 24 цикле солнечной активности, были связаны с КВМ. При этом 84% таких вспышек произошли в АО, входящих в состав КА [22].

Сопоставление КВМ с гамма-вспышками на Солнце приводит к аналогичному выводу: эти два типа наиболее энергичных проявлений солнечной активности оказываются тесно связанными: например, в 24 цикле отмечено 31 гамма-событие, и все они сопровождались КВМ. Согласно

[23], гамма-вспышки в 24 цикле происходили либо в АО в составе КА, либо (иногда) в индивидуальных, но достаточно крупных и сложных АО вне КА.

Тем не менее настоящее исследование показало, что имели место и другие случаи: КВМ порождались не очень большими АО, а также возникали в отсутствие групп пятен в районе старых АО, где сохранились факельные площадки. Здесь, вероятнее всего, в основе КВМ лежала эрупция высоких диффузных волокон (протуберанцев), которые никогда не наблюдаются внутри АО.

Примененная геометрическая методика идентификации мест формирования КВМ, безусловно, обладает рядом погрешностей, и в ряде неоднозначных случаев решение о привязке КВМ к той или иной АО, включая “старые” АО без пятен, принималось авторами. Тем не менее основной вывод не меняется: значительная часть КВМ порождалась в АО либо вблизи АО.

Следует заметить, что этот вывод может быть отнесен только к фазе спада цикла. Процентное распределение зон зарождения КВМ на других этапах развития цикла может оказаться иным, — например, на фазе минимума цикла, когда пятен практически нет, а КВМ, тем не менее, возникают.

Вызывает вопрос выявленное заметное боковое отклонение проекций продолжений траекторий движения КВМ от центроидов АО. Случаев, когда проекция продолжения траектории не пересекала группу пятен, а проходила в 5–10 градусах от пятен АО (примерно в 60–120 Мм), оказалось много. При этом КВМ, связанные с сильными вспышками рентгеновского X-класса возле долгоживущего пятна в уникальном комплексе активности [24], согласно использованной методике, также происходили не в самой АО, а около этой АО. Это обстоятельство требует дополнительного анализа.

В работе [25] было выполнено детальное исследование девяти сильных солнечных вспышек, сопровождавшихся КВМ, по данным наблюдений хромосферы в линии H_{α} . Все эти примеры продемонстрировали, что на ранней стадии развития хромосферной вспышки, когда начинают формироваться эмиссионные вспышечные ленты, наблюдаются, кроме того, специфические тонкоструктурные эмиссионные образования — структуры на концах вспышечных лент (СКВЛ), периферийные структуры (ПС) и отдаленные уярчения (remote brightenings, или RB). Для объяснения происхождения этих структур авторами было выдвинуто предположение, что именно так выглядят основания магнитного жгута, который позднее трансформируется в тело КВМ. Эта концепция может быть проиллюстрирована изображением на рис. 6.

В работах [26, 27] приведено детальное описание хромосферных вспышечных структур, вызвавших сорок лет назад определенное недоумение — двойная эмиссионная дорожка, быстро вытягивавшаяся по направлению к головному пятну АО, располагалась в пределах области одного знака магнитного поля (ПС на рис. 6). Это обстоятельство не позволяло объяснить данный феномен аналогично классической модели вспышечных лент как цепочки оснований магнитных арок по обе стороны от нейтральной линии. В работе [25] эмиссионные периферийные структуры ПС интерпретируются как цепочки систем вложенных корональных арок, формирующих одно из оснований будущего КВМ.

Кроме того, во вспышке наблюдались отдаленные уярчения (RB), которые рассматривались как хромосферное проявление второго основания КВМ. Эти уярчения, расположенные через экватор к югу от вспышечного КА на расстоянии 200–300 Мм, проявляли себя как группа узлов усиленной хромосферной сетки, которые существенно увеличивали яркость во время вспышки (контраст по отношению к среднему уровню невозмущенной хромосферы поднимался от 1.28 до 1.73).

Аналогичные примеры еще восьми вспышек, сопровождавшихся КВМ, приведены в работе [25]. Во всех этих случаях в хромосфере наблюдались яркие динамично меняющиеся эмиссионные спиралевидные структуры на концах вспышечных лент внутри АО, а также тонкоструктурные эмиссионные образования — периферийные структуры и отдаленные уярчения за пределами АО.

Схема формирования КВМ во время сильной вспышки в крупной АО показана на рис. 7.

Важной особенностью описанных структур является тот факт, что первоначальный магнитный жгут, судя по всему, является существенно асимметричным: одно из его оснований находится в области сильных магнитных полей вблизи пятен внутри АО и вблизи нейтральной линии (структура СКВЛ), тогда как второе основание расположено достаточно далеко (на расстоянии до 300 Мм), в области факельной площадки (флоккула), на периферии АО или даже за ее пределами (периферийная структура ПС и отдаленное уярчение RB). В результате середина магнитного жгута (в будущем — центр поднимающегося купола КВМ) оказывается заметно смещенной относительно центроида группы пятен АО. Эффекты, связанные с наклоном плоскости магнитного жгута и первоначально нерадиального направления движения КВМ, усиливают этот эффект. В результате может сформироваться впечатление, что КВМ образовался вдали от АО и даже не имеет к ней отношения. Данные, получен-

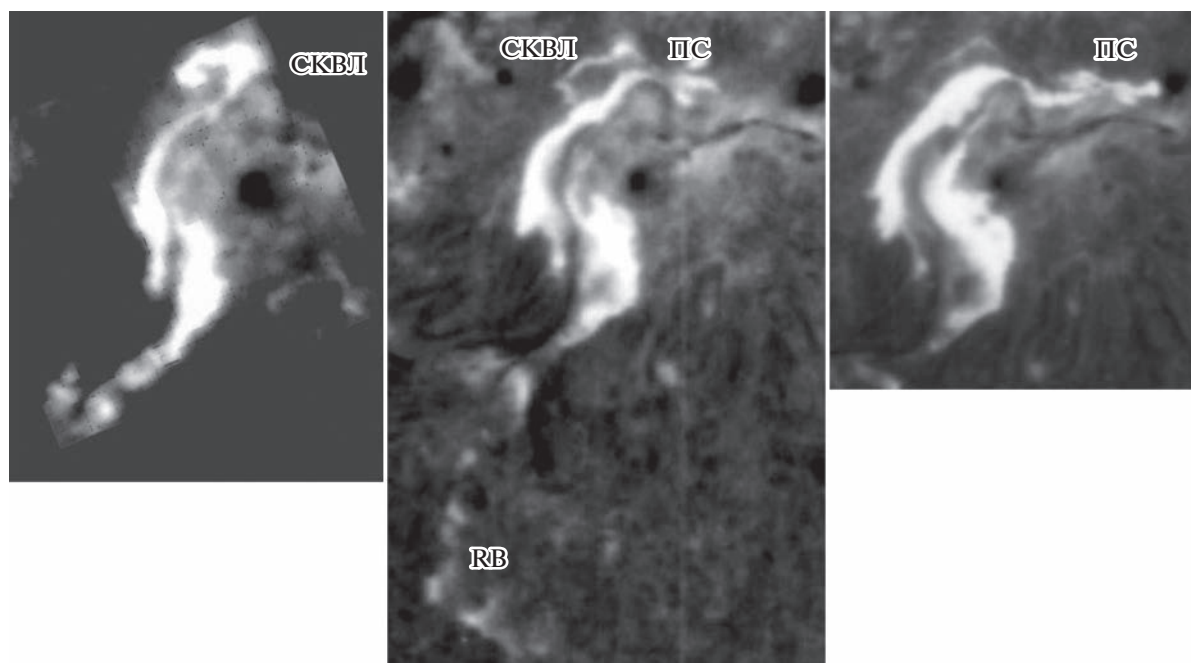


Рис. 6. Фильтрограммы в линии H α вспышки 16 мая 1981 г., балл 3В/X1, фото С.А. Язева, полученное в Байкальской астрофизической обсерватории (БАО) ИСЗФ СО РАН. Показаны: СКВЛ спиральной формы во время импульсной фазы вспышки, цепочка отдаленных уярчений RB, двойная полоска эмиссии периферийных структур (ПС).

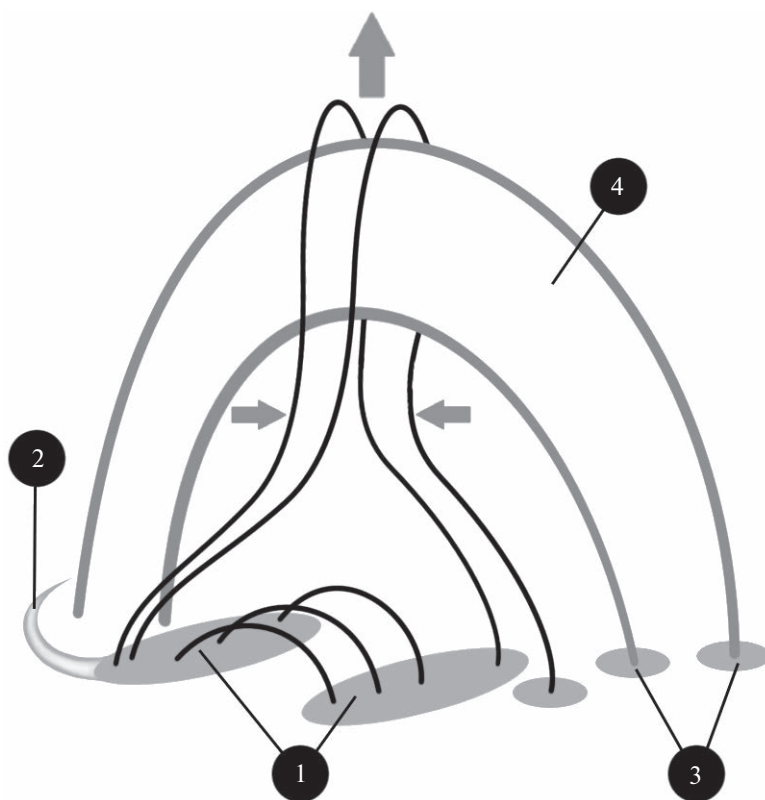


Рис. 7. Схема крупной вспышки с КВМ. Показаны вспышечные ленты (1), а также хромосферные основания КВМ: СКВЛ (2) — структуры на концах вспышечных лент, — отдаленные уярчения (remote brightenings) (3). КВМ, опирающийся на СКВЛ и на RB, представлен в виде магнитного жгута (4). Ниже КВМ горизонтальными стрелками показано образование высоких вспышечных петель.

ные в настоящей работе, указывают (с точки зрения авторов) на то, что с учетом изложенных факторов фактически все выбросы КВМ связаны с АО: либо во время существования пятен на основе несимметричной магнитной петли, одно из оснований которой находится далеко за пределами АО, либо на фазе разрушения АО и исчезновения пятен внутри факельной площадки, где нейтральную линию трассирует диффузное волокно (протуберанец), способное к эрупции.

Результаты работы могут быть сформулированы следующим образом.

1. По данным наблюдений коронографами космического аппарата SOHO в период с ноября 2006 по февраль 2007 г. показано, что подавляющая часть (63.5%) из 345 отмеченных в этот период КВМ сформировались в районе АО, содержащих пятна.

2. Большая часть КВМ, формально не связанных с группами пятен, обнаруживает, тем не менее, связь с АО, в которых пятна существовали 1–3 кэррингтоновских оборота назад. С учетом этих случаев, доля КВМ, связанных в том или ином смысле с АО, оказывается близкой к 90%. Для оставшихся выбросов КВМ недостаточно информации, чтобы сделать окончательный вывод.

3. Максимумы распределений значений углов раскрытия КВМ различаются для случаев возникновения в АО с пятнами и без пятен АО. Для КВМ, возникающих в АО с пятнами, максимум распределения лежит в пределах 10–30°, для КВМ в беспятенных областях максимум распределения – меньше 10°.

4. Смещение области возникновения КВМ от пятен внутри АО может быть связано с асимметрией магнитного жгута, порождающего КВМ: одно основание жгута находится в области сильного магнитного поля вблизи пятен, второе основание – в области слабых флоккульных полей на периферии или за пределами АО.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при поддержке проекта “Астрофизический комплекс МГУ-ИГУ”, соглашение ЕВ-075-15-2021-675 Министерства науки и высшего образования РФ (проекты FZZE-2023-0004, FZZE-2020-0017, FZZE-2020-0024).

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность М.Ю. Савинкину за возможность использования авторской компьютерной программы [20].

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. N. Gopalswamy, *Geoscience Letters* **3**, 8, 18 (2016).
2. P. L. Lamy, O. Floyd, B. Boslet et al., *Space Science Rev.* **215**, 39 (2019).
3. R. Schwenn, *Living Rev. Sol. Phys.* **3**, 2 (2006).
4. M. Temmer, *Living Rev. Sol. Phys.* **18**, 4 (2021).
5. A. Compagnino, P. Romano, F. Zuccarello, *Solar Phys.* **292**, 5 (2017).
6. Е. Р. Прист, Т. Форбс *Магнитное пересоединение. МГД теория и приложения* (М.- Физматлит, 591 с., 2005).
7. D. F. Webb, *Adv. Space Res.* **11**, 1, 37–40 (1991).
8. В. Д. Кузнецов, *Плазменная гелиогеофизика в 2 т.* (М.-Физматлит, Т. 1, под ред. Л. М. Зеленого, И. С. Веселовского. с. 81–97, 2008).
9. Б. П. Филиппов *Эруптивные процессы на Солнце* (М.-Физматлит, 216 с., 2007).
10. S. Majumdar, R. Patel, R. Pant et al., *Astrophys. J.* **919**, 115, 8 (2021).
11. L. Liu, Y. Wang, Z. Zhou, et al., Major Flares and CMEs in Emerging Active Regions. The Source Locations, *Astrophys. J.* **909**, 142, 23 (2021).
12. И. А. Биленко, *Солнечно-земная физика* **12**, 1, 60–61 (2008).
13. P. Subramanian, *Astrophys. J.* **561**, 372 (2001).
14. В. Н. Обридко, Ю. А. Наговицын *Солнечная активность, цикличность и методы прогноза* (СПб: Изд-во ВВМ, 466 с., 2017).
15. Е. В. Иванов, Г. В. Руденко, В. Г. Файнштейн, *Солнечно-земная физика* **12**, 1, 36–38 (2008).
16. Е. В. Иванов, *Труды конференции. С.-Петербург, Пулков. 3–9 октября 2010* (С. Петербург, ГАО РАН, с. 163–166, 2010).
17. M. Yu. Savinkin, V. I. Sidorov, S. A. Yazev, *Geomagnetism and Aeronomy* **49**, 8, 1072–1075 (2009).
18. Г. Я. Смольков, А. М. Уралов, И. А. Бакунина, *Солнечно-земная физика* **12**, 1, 40–43 (2008).
19. <https://umbra.nascom.nasa.gov/SEP/>.
20. М. Ю. Савинкин, С. А. Язев, *Исследователь Солнца в единой неискаженной системе координат* (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2009610344. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 13 января 2009).
21. Г. М. Хмыров, С. А. Язев *Исследования по геомагнетизму, аэронауке и физике Солнца* (М.: Наука, вып. 91, с. 55–62, 1990).
22. Е. С. Исаева, В. М. Томозов, С. А. Язев, *Астрон. журн.* **3**, 256–264 (2018).
23. В. М. Томозов, С. А. Язев, Е. С. Исаева, *Астрон. журн.* **97**, 8, 722–730 (2020).
24. V. I. Sidorov, S. A. Yazev, *Geomagnetism and Aeronomy* **49**, 8, 1076–1079 (2009).
25. В. И. Сидоров, Г. Н. Кичизин, С. А. Язев, *Серия “Науки о Земле”* **3**, 2, 139–155 (2010).

26. В. Г. Банин *Исследования по геомагнетизму, аэронауке и физике Солнца* (М.: Наука, вып. 65, с. 129–150, 1983).
27. В. Г. Банин, А. В. Боровик, С. А. Язев *Исследования по геомагнетизму, аэронауке и физике Солнца* (М.: Наука, вып. 65, с. 151–164, 1983).

TO THE QUESTION OF THE LOCALIZATION OF CME GENERATION ON THE SUN

S. A. Yazev^{a,b} and V. M. Tomozov^b

^a*Irkutsk State University, Irkutsk, Russia*

^b*Institute of Solar-Terrestrial Physics of the Siberian Branch of the RAS, Irkutsk, Russia*

The localization of CME occurrence zones on the Sun from November 2006 to February 2007 was studied using the SOHO catalog. A method is described for comparing such zones with active regions (ARs) both in the visible and invisible hemispheres of the Sun. It is shown that a simple linear continuation of the projections of the CME trajectory on the Sun in many cases passes by the AO. 63.5% of CMEs managed to be tied to ARs, 19% failed, and for 17.5% a choice must be made between ARs and flare sites, where spots were observed 1–3 rotations of the Sun earlier. The hypothesis is discussed that the displacement of the beginning of the CME trajectory from the AR centroid is associated with the asymmetry of the location of the magnetic rope, on the basis of which the CME is formed, with respect to the AO: one base of the rope is located near the strong magnetic fields of sunspots, the second is in the region of weak fields on the periphery or outside the AO.

Keywords: coronal mass ejections, active regions, sunspots