УДК 523.985

ВСПЫШКА С ВОЗВРАТНЫМ ПРОТУБЕРАНЦЕМ: СЦЕНАРИЙ, ЭНЕРГЕТИКА И ПРОГНОЗ

© 2011 г. В. И. Сидоров^{1, 2}, Ю. В. Кузьминых¹, С. А. Язев^{1, 2}

¹Институт солнечно-земной физики СО РАН, г. Иркутск ²Астрономическая обсерватория ИГУ, г. Иркутск Поступила в редакцию 02.06.2009 г.

На основании анализа солнечных событий 18.VIII.1995 г. (SN/C1.9) на лимбе и 23.IX.1998 г. (3В/М6.9) на диске предлагается новый сценарий вспышки, сопровождающейся возвратным протуберанцем, в котором обратное движение протуберанца является причиной дополнительного энерговыделения и формирования второй системы вспышечных лент. Наблюдения в линиях H_{α} , а также потоков рентгеновского излучения в диапазонах 1-8 Å и 0.5-4 Å дополнены для второго случая данными в линии 1550 Å. Сценарий предусматривает две стадии развития. На первой происходит энерговыделение в токовом слое, обеспечивающее как ускорение выброса вверх от солнечной поверхности, так и саму вспышку, включая нагрев вспышечной области, потери на излучение и на теплопроводность. Вторая стадия вспышки обеспечивается энергией падения вещества протуберанца на хромосферу. Вторая пара вспышечных лент, наблюдающаяся в этой стадии, предлагается в качестве хромосферного критерия реализации данного сценария для вспышек на диске. Энергия, высвободившаяся во время первой стадии вспышки 23.IX.1998 г., составила ~3 · 10³¹ эрг. Часть ее, затраченная на вспышечные процессы, ~0.5 · 10³¹ эрг. Оставшаяся часть, представляющая энергию выброса, согласуется по порядку величины с рассчитанным значением энергии вспышки во второй стадии, что не противоречит предложенному сценарию. Раннее распознавание такого сценария для вспышек на диске может быть использовано для оперативного прогноза космической погоды. В частности, вспышка с возвратным протуберанцем позволяет прогнозировать отсутствие яркого "ядра" коронального выброса массы.

ВВЕДЕНИЕ

В работе [1] представлена топологическая модель, предусматривающая единый механизм формирования крупной солнечной вспышки и коронального выброса массы. Эта модель основана на анализе хромосферных явлений, наблюдающихся во время мощных вспышек в комплексах активности и крупных активных областях на Солнце. В частности, были выделены, описаны и объяснены в рамках указанной модели такие типы вспышечных активных образований, как кольцеобразные яркие структуры на концах вспышечных лент (СКВЛ) и динамичные эмиссионные периферийные структуры (ПС) [2]. Согласно модели, СКВЛ и ПС представляют собой основания арочного крупномасштабного магнитного жгута на разных этапах развития, который в процессе эрупции поднимается в корону, формируя корональный выброс массы (КВМ).

В настоящей работе, являющейся продолжением первой, показано, что феномен так называемых возвратных протуберанцев может быть объяснен в рамках того же подхода. Как известно, наблюдаемое на лимбе в свете хромосферных линий явление возвратных протуберанцев сводится к следующему. Во время лимбовой вспышки наблюдается быстрая эрупция вещества протуберанца, что хорошо видно в картинной плоскости как подъем (вытягивание) протуберанца вверх от Солнца. В дальнейшем происходит замедление движения с последующим переходом к обратному перемещению выброшенного вещества вдоль силовых линий магнитного поля вниз к хромосфере. По-видимому, подобные явления наблюдаются и на диске, однако их достаточно сложно выявлять из-за наложений различных направлений движений вещества во вспышке вдоль луча зрения и неоднозначной интерпретации соответствующих проявлений эффекта Доплера.

В работе показано, что некоторые типы вспышечных хромосферных явлений, наблюдаемых на диске Солнца, могут быть интерпретированы, как эрупция протуберанца с последующим падением выброшенного вещества обратно на хромосферу. Наблюдаемые явления укладываются в разрабатываемую авторами концепцию мощного солнечного события, включающего в себя вспышку и выброс вещества. Концепция допускает реализацию по крайней мере двух вариантов сценария события. В первом варианте, вещество выбрасывается с межпланетное пространство, образуя КВМ с ярким "ядром". Во втором варианте вещество эруптивного протуберанца падает

обратно на Солнце и, следовательно, если даже КВМ образуется, то, скорее всего, он будет без "ядра" [3]. Анализ комплексных данных наблюдений позволяет предположить, что по характеру развития ярких хромосферных структур (вспышечных лент ВЛ, СКВЛ и ПС) можно осуществлять раннюю диагностику события и делать заключение, будет ли событие сопровождаться корональным выбросом массы либо возвратным протуберанцем. Наблюдения этих явлений на диске обычно затруднены: если событие происходит на диске, то в этом случае и КВМ, и возвратный протуберанец движутся на наблюдателя. На фоне яркого диска Солнца развитие эрупции может быть скрыто от наблюдателя из-за быстрых изменений температуры и невысокой переменной плотности выброшенного вещества. Если растущий КВМ не имеет яркого "ядра" и его угол расхождения невелик, он входит в область зрения коронографа за пределами центральной маски тогда, когда плотность КВМ уже недостаточна для точной диагностики. При другом варианте развития выброса, эруптивный возвратный протуберанец также может быть "замаскирован" яркими деталями вспышечного события на диске. Однозначная интерпретация таких явлений, особенно, когда отсутствуют наблюдения на коронографах LASCO космического аппарата SOHO и в некоторых других диапазонах длин волн, оказывается сложной задачей. Результаты настоящей работы позволяют определить наблюдательные критерии, согласно которым отождествление типа события при наблюдениях на диске упрощается.

ВСПЫШКА С ВОЗВРАТНЫМ ПРОТУБЕРАНЦЕМ 18.VIII.1995 г.

Для изучения сценария событий типа "вспышка — возвратный протуберанец" выполнен анализ достаточно полно наблюдавшегося лимбового события 18.VIII.1995. Хотя событие включало вспышку небольшой мощности, оно наглядно демонстрирует характерные особенности такого класса явлений.

Использованы наблюдения обсерватории BBSO, выполненные в линии H_{α} . На восточном лимбе хорошо просматривалось одновременное развитие вспышки и эруптивного протуберанца. Вспышка SN/C1.9 наблюдалась с 17.17 UT (здесь и далее время мировое) по 18.02 с максимумом развития в 17.22 (рис. 1) [4]. Максимум рентгеновского всплеска отмечен в 17.11.

Одно из оснований арочного протуберанца было компактным и находилось непосредственно вблизи вспышечной аркады, второе основание располагалось на значительном удалении от области вспышки. В структуре протуберанца четко проявлялась спиральная закрутка продольных

"прядей" магнитного жгута вдоль арки. Если первое основание видимым образом не изменялось во время вспышки, то второе значительно удлинилось во время фазы максимума вспышки. Первое (компактное) основание расширялось с высотой и напоминало перевернутый усеченный конус. Bo втором (удаленном) основании наблюдался процесс "расплетания" закрученной структуры протуберанца над хромосферой. Следует отметить (рис. 1), что хромосферная вспышечная эмиссия в удаленном основании была более сильной на его краях по сравнению с ситуацией в центре. При наблюдении подобной ситуации в другом ракурсе (вспышка на диске), хромосферная эмиссия в этом основании, очевидно, выглядела бы в виде яркого кольца на фоне хромосферы, подобно СКВЛ.

Изменения высоты нескольких характерных элементов протуберанца, а также график мягкого рентгеновского излучения (1–8 Å) по данным КА *GOES* представлены на рис. 2. Интервал наблюдений протуберанца, к сожалению, не захватывает начало рентгеновской вспышки, но ретроспективное проецирование положения характерных деталей протуберанца на поверхность Солнца убеждает в том, что начало вспышки и эрупция протуберанца произошли одновременно, что указывает на возможность существования единого источника энергии для вспышки и для эрупции протуберанца.

На второй стадии события наблюдалось ослабление эмиссии вспышечной аркады. Происходило падение вещества протуберанца, сопровождавшееся хромосферной эмиссией в его основа-Второй, ниях. сравнительно небольшой, максимум рентгеновского всплеска вблизи 17.50 можно интерпретировать как свидетельство дополнительного вспышечного энерговыделения вследствие падения вещества протуберанца. Магнитные "пряди" протуберанца, на порядок превышавшие в максимуме высоту вспышечных петель, снизились в полтора-два раза. Их структура заметно упростилась, пряди магнитного жгута протуберанца сформировали верхний ярус петель над затухающей вспышкой.

Описанные процессы развития лимбового события 18.VIII.1995 г. позволяют предложить новый сценарий развития вспышки, сопровождающейся явлением возвратного протуберанца.

ЭНЕРГЕТИКА И СЦЕНАРИЙ ВСПЫШКИ С ВОЗВРАТНЫМ ПРОТУБЕРАНЦЕМ

Предлагаемый сценарий включает в себя две стадии развития события.

Первая стадия длится от начала события до максимального подъема протуберанца в корону.



Рис. 1. Вспышка с возвратным протуберанцем 18.VIII.1995 г. (данные BBSO). Стрелками на фильтрограммах показаны характерные долгоживущие сгущения плазмы Ф5 и Ф7.

Важным элементом сценария является недостаточность разгона выброса для того, чтобы он преодолел притяжение Солнца. Его движение вверх замедляется и прекращается на высоте, близкой к величине радиуса Солнца над уровнем фотосферы [3]. Выброс наблюдается в виде системы скру-



Рис. 1. Продолжение.

ченных волокон (магнитный жгут), укорененных одним основанием вблизи вспышечных лент. Соприкасание спиралевидных магнитных петель выброса и вспышечных петель [1] (см. рис. 1 в [1]) определяет место первичного энерговыделения. Важным фактом представляется совпадение временных интервалов ускорения выброса и роста эмиссии вспышки, наблюдаемой в линии H_α.



Рис. 1. Окончание.

Энергетические процессы на первой стадии события можно представить следующим образом. Первичное энерговыделение (вспышечное энерговыделение в токовом слое) обеспечивает энер-

гией как расположенную ниже вспышку, включая нагрев вспышечной области вместе с потерями на излучение и теплопроводность, так и поднимающийся вверх протуберанец. Оставляя вопрос о

механизме ускорения эрупции за рамками данного исследования, можно предположить, что часть магнитной энергии электрического тока, высвобождающейся в процессе пересоединения, трансформируется в кинетическую энергию поднимающегося вещества. При достижении максимальной высоты подъема эта энергия превращается в потенциальную энергию вещества, содержащегося в выбросе. Естественно полагать, что запас непотенциальной энергии магнитного поля "тратится" в событии неравномерно, и ее часть, обеспечивающая подъем протуберанца, со временем vменьшается, что и является причиной замедления и остановки. Соответственно, поток высвобожлающейся непотенииальной магнитной энергии, обеспечивающий вспышку, к концу этой стадии также падает. Можно предположить, что энергия протуберанца равна полной энергии события за вычетом энергии, потраченной в первой стадии на вспышку. Метод соответствующих расчетов описан в [5].

На второй стадии эмиссия вспышечных лент уменьшается, как и скорость их расхождения. Вещество протуберанца падает обратно на хромосферу, двигаясь вдоль его спиральных силовых магнитных линий. Сам протуберанец в виде системы скрученных волокон опускается (падает) вниз. Усиливается хромосферная эмиссия в местах падения вещества (основаниях протуберанца). Зона эмиссии близка к расположению затухающих вспышечных лент лишь в том месте, где компактное основание магнитного жгута примыкает к лентам. Другая, значительная часть зоны эмиссии, находится в отдалении от первоначальных лент, там, где находится широкое основание магнитного жгута. Магнитные петли протуберанца располагаются над арками вспышки, опирающимися на вспышечные ленты.

Первичное энерговыделение на второй стадии близко к нулю. Это следует из наблюдаемого для большинства вспышек окончания эмиссии жесткого рентгеновского излучения к моменту максимума развития в линии H_{α} . Предполагается [6], что интенсивность жесткого рентгеновского излучения пропорциональна скорости высвобождения энергии, имеющей происхождением магнитное пересоединение.

Сумма кинетической и потенциальной энергии протуберанца на этой стадии не увеличивается.

Потенциальная энергии поднятого вещества протуберанца преобразуется в кинетическую энергию при его падении на хромосферу. Соответственно, энергия падающего вещества трансформируется в энергию хромосферной вспышки, локализованной вблизи оснований протуберанца.



Рис. 2. Временные изменения потока рентгеновского излучения (нижний график, "мягкий" канал КА *GOES*, шкала слева) и высоты некоторых характерных фрагментов протуберанца (верхние графики, шкала справа) в ходе развития вспышки 18.VIII.1995 г.

ВСПЫШЕЧНОЕ СОБЫТИЕ НА ДИСКЕ 23.IX.1998 г.

Рассмотрим солнечное событие, наблюдавшееся на диске 23.IX.1998 г. (3В/Мб.9). Событие включало в себя хромосферную вспышку с последовательным развитием двух пар квазиортогональных вспышечных лент. Исследователи этой вспышки [7—10] проанализировали ее эволюцию в хромосфере и короне, а также особенности развития в разных диапазонах спектра электромагнитных волн. Тем не менее, в этих работах не говорилось о возможной роли возвратного протуберанца в развитии второй пары вспышечных лент.

Во время события 23.IX.1998 г. не было наблюдений на коронографах LASCO/SOHO, и это обстоятельство вносит определенную интригу. Интерпретация события возможна в двух разных вариантах. Вспышка могла сопровождаться КВМ типа "гало". В этом случае высвобождение энергии в токовом слое (TC) должно обеспечить как вспышку, так и ускорение КВМ [1]. С другой стороны, если имел место эруптивный протуберанец, вернувшийся обратно к поверхности Солнца, энергетика события усложняется.

Для исследования были привлечены данные в линии H_{α} обсерватории Ондржейов, в линии 1550 Å KA *TRACE*, данные потоков рентгена в диапазонах 1— 8 Å и 0.5—4 Å KA *GOES*. Эрупция протуберанца, произошедшая одновременно с развитием вспышки, хорошо представлена в линии 1550 Å на рис. 3.

К сожалению, для изучаемого события наблюдательных данных, указывающих на возврат протуберанца, не найдено. Тем не менее, можно ука-



Рис. 3. Начало вспышки 23.IX.1998 г. в линии 1550 Å по данным *TRACE*. Прослеживается эрупция волокна (протуберанца) — показано толстыми стрелками. Тонкая структура волокна в виде "прядей" хорошо различима. Расходящиеся вспышечные ленты (ВЛ1) обозначены толстыми двойными стрелками. Основания протуберанца — тонкими стрелками.

зать следующие наблюдательные факты, которые могут быть интерпретированы в пользу возврата протуберанца.

1. Наблюдавшаяся в линии 1550 Å (рис. 3) система волокон укоренена одним из оснований в месте хромосферных уярчений к западу от первой пары вспышечных лент, где позднее возникла область мощной хромосферной эмиссии.

2. Возникновение второго "купола" вспышечных арок, опирающихся на внешнюю пару вспышечных лент [8]. Этот "купол" образовался над нижней аркадой вспышечных арок, опирающихся на первую внутреннюю пару вспышечных лент. 3. Почти одновременно с началом второй стадии вспышки в крыле линии H_{α} наблюдалось движение плазмы вниз со скоростью 80 км/с [8].

Таким образом, вся совокупность имеющихся данных наблюдений не противоречит предложенному сценарию и, скорее, его поддерживает. Развитие хромосферных оснований магнитного жгута, рассмотренное в русле топологической модели [1], дает убедительные доводы в пользу возврата в событии 23.IX.1998 г. наблюдавшегося эруптивного протуберанца и его значительной роли в развитии вспышки.

Определение стадий вспышки было выполнено на основе описанного выше сценария. Так, от



Рис. 4. Изображения вспышки 23.IX.1998 г. в линии H_α (Ондржейов, Чешская Республика): верхний ряд – снимки грубого качества, полученные на многоканальном спектрографе; нижний ряд – высококачественные фильтрограммы. Наклонными стрелками в 06.56 показаны первые вспышечные ленты. Вертикальной стрелкой обозначена эмиссия западной структуры на концах вспышечных лент, более сильная с внешней стороны "сплющенного овала". В 07.23 видна мощная вторая пара вспышечных лент, квазиортогональная паре ВЛ1, которая к этому моменту практически исчезла. Можно по характерным неизменившимся особенностям эмиссии показать, что западная ВЛ2 локализована на месте внутренней эмиссии "овала" СКВЛ (обозначено горизонтальными стрелками).

начала вспышки в 06.47 до начала развития второй пары вспышечных лент продолжается первая стадия (рис. 4 — в линии H_{α}). В это время происходит развитие первой пары вспышечных лент (ВЛ1) и небольших эмиссионных структур на концах вспышечных лент, или СКВЛ, [1], предположительно, в местах укоренения оснований арочного протуберанца.

Первая стадия события иллюстрируется на рис. 3, где хорошо различимы пара вспышечных лент ВЛ1 и эруптивное поднимающееся вещество протуберанца в виде системы скрученных волокон. Одно основание эруптивного протуберанца компактное, второе основание - более протяженное. Компактное основание плотно примыкает к южной вспышечной ленте пары ВЛ1. Из этого основания (СКВЛ) веером расходится вверх и по направлению к другому основанию система скрученных волокон. Описанная СКВЛ отличается от южной вспышечной ленты только тем, что является основанием более высоких спиралевидных петель выброса, отличающихся по топологии от низких вспышечных петель вспышечной аркады. По наблюдениям хромосферы, без специального наблюдения петель, невозможно отделить эту СКВЛ от южной ленты пары ВЛ1.

Второе основание выброса (системы скрученных волокон) имеет другую структуру. Оно удалено от лент ВЛ1. Структура эмиссии напоминает "сплющенный овал". Внутри этого "овала" эмиссии нет.

Начало второй стадии развития вспышки определено в 06.58 по соответствующему возрастанию отношения потоков рентгеновского излучения, измеренных КА *GOES* (0.5–4 Å к 1–8 Å, соответственно). Согласно [7], импульсная стадия окончилась также в 06.58.

Вторая стадия события показана на рис. 4. От первоначальных вспышечных лент ВЛ1 остались небольшие участки. Один из них, вблизи тени большого пятна, соприкасается с эмиссией, которую на первой стадии вспышки мы называли СКВЛ. Эта СКВЛ преобразовалась в западную ленту внешней второй пары вспышечных лент ВЛ2. Возросла эмиссия на внутренней стороне "сплющенного овала".

Другая СКВЛ, которую на первой стадии можно было отделить от южной вспышечной ленты ВЛ1 только по топологии магнитных петель, стала еще более неотличима от южной ВЛ1. Более того, эти структуры слились, и вместе они образовали восточную ленту второй пары вспышечных лент ВЛ2, развернутую относительно южной ВЛ1 примерно на 60 градусов. Бывшие СКВЛ трансформировались в пространственно разнесенные мощные эмиссионные образования ВЛ2. Представляется, что вспышечные петли, бывшие яркими и соединявшие ВЛ1 на первой стадии вспышки, накрыты сверху опустившимися петлями протуберанца, которые потеряли спиральную закрутку [11], и соединяют вторую пару вспышечных лент ВЛ2 на второй стадии вспышки.

Причиной эмиссии ВЛ2 на второй стадии события, как это было показано ранее, является падение вещества протуберанца вдоль тех же магнитных силовых линий, по которым на первой стадии вспышки вещество, испарившееся из хромосферы в районе СКВЛ, двигалось с ускорением вверх.

РАСЧЕТ ЭНЕРГЕТИКИ СОБЫТИЯ 23.IX.1998 г.

Темп высвобождения энергии в TC на первой стадии события можно описать, согласно адаптированному одним из авторов [5] методу, опубли-

кованному в работе [12], как поток вектора Пойнтинга, $B_{cor}^2 \cdot V_{in}/(4\pi)$, в область пересоединения *S*:

$$dE/dt = 2B_{cor}^2 V_{in} S/(4\pi), \qquad (1)$$

где B_{cor} – среднее значение магнитного поля в короне над АО, в которой произошла исследуемая вспышка, V_{in} – скорость втекания в область пересоединения, S – площадь области пересоединения. Согласно [12], справедливо выражение:

$$B_{cor}V_{in} = B_{phot}V_{H\alpha},\tag{2}$$

где $B_{phot} \sim 300$ Гс — среднее значение магнитного поля на фотосфере AO в местах локализации вспышечных петель ВЛ1 (оценено по магнитограмме обсерватории Китт-Пик, см. рис. 2 в [7]), $V_{\rm H\alpha}$ — средняя скорость расхождения оснований вспышечных петель, измеренная по данным в линии H_α. Согласно описанному выше сценарию, при расчете баланса энергии на первой стадии события используется только площадь первых вспышечных лент ВЛ1. Значение параметра $V_{\rm H\alpha}$ измерено по фильтрограммам в линии H_α и составило 5 · 10⁴ м/с.

Преобразованное выражение (1) принимает вид:

$$dE/dt = 2B_{cor}B_{phot}V_{H\alpha}S/(4\pi).$$
 (3)

Примем неизвестное значение $B_{cor} \sim 1/4 B_{phot}$. На первой стадии события, площадь магнитного пересоединения *S*, можно оценить по порядку величины как 1/2 средней площади вспышечных лент, которая составляет приблизительно половину максимальной площади первой пары вспышечных лент ВЛ1, $S_{BЛI} \approx 10^{15}$ м². Тогда, на временном интервале от начала вспышки до ее максимума скорость высвобождения магнитной энергии можно определить из выражения:

$$dE/dt = 1/2B_{ph}^2 V_{\rm H\alpha} 1/2S_{\rm H\alpha}/(4\pi).$$
 (4)

В результате интегрирования выражения (4) в интервале первой стадии (от 06.47 до 06.58) получим $\sim 3 \cdot 10^{31}$ эрг.

Временной ход затрат энергии источника на нагрев области вспышки, а также на излучение и теплопроводность, рассчитан согласно [13]:

$$Q = \dot{E}_{cond} + \dot{E}_{rad} + \dot{E}_{th}, \tag{5}$$

где \dot{E}_{cond} – поток энергии из вершин вспышечных петель к основаниям, распространяющийся за счет теплопроводности, \dot{E}_{rad} – поток излучаемой энергии, \dot{E}_{th} – поток энергии, затраченной на нагрев области вспышки, Q – суммарный поток энергии.

Потери за счет теплопроводности были рассчитаны, согласно выражению:

$$\dot{E}_{cond} = k_0 T'^2 S_{loop} / l,$$
 (6)

где $k_0 = 10^{-6}$ эрг с⁻¹ см⁻¹ К^{-7/2} согласно [14], T - эффективная температура, $S_{loop} -$ площадь сечения вспышечных петель была оценена как $1/2S_{\text{H}\alpha}$, l – средняя длина вспышечных петель.

Поток энергии, затраченной на нагрев области вспышки, определен из выражения:

$$\dot{E}_{th} = \{E_{th}(t + \Delta t) - E_{th}(t)\}/\Delta t, \qquad (7)$$

где $\Delta t = 60$ с.

Тепловая энергия E_{th} , содержащаяся в объеме, занятом вспышкой, приближенно рассчитана по одноминутным данным спутника *GOES*, согласно [15]:

$$E_{th} = 3kT\sqrt{EM}^{flare}V^{flare},$$
(8)

где k — коэффициент Больцмана; V^{flare} — объем области вспышки; T — эффективная температура вспышки, EM^{flare} — соответствующая мера эмиссии вспышки по [16].

Поток излучаемой энергии рассчитан согласно выражению:

$$\dot{E}_{rad} = EM^{flare}\Lambda(T), \tag{9}$$

где $\Lambda(T)$ – функция радиативных потерь [17].

Объем вспышки в каждый момент времени определялся из выражения:

$$V^{flare} = (S_2)^{3/2}, (10)$$

где S₂ — площадь между внешними границами вспышечных лент ВЛ1.

Интеграл потока энергии Q, затраченной на вспышечные проявления на первой стадии события (06.47–06.58), составил значение $0.5 \cdot 10^{31}$ эрг с точностью до фактора 2.

Расчет энергетики события на второй стадии включал только вспышечную часть. Энергия вспышки рассчитана по формулам (5)–(10). Площадь сечения вспышечных петель S_{loop} была оценена как $1/2S_{\rm B72}$. S_2 – площадь между внешними границами зоны эмиссии вспышки в линии H_{α} . Продолжительность второй стадии события определена 06.58–07.30 по характеру изменений рентгеновского излучения, измеренного KA *GOES*. В результате получено, что потребление энергии вспышкой на второй стадии события составило около $3 \cdot 10^{31}$ эрг с той же точностью.

Итак, энергия, высвободившаяся в TC на первой стадии события составила $\sim 3 \cdot 10^{31}$ эрг, в том числе энергия, затраченная на обеспечение вспышечных процессов, — $\sim 0.5 \cdot 10^{31}$ эрг. Согласно первоначальному предположению, кинетическая энергия выброса (в данном случае возвратного протуберанца) должна быть близка к разнице этих значений. Рассчитанное значение энергии вспышки во второй стадии, $\sim 2.7 \cdot 10^{31}$ эрг, оказалось близким к ожидаемому. Таким образом, проведенные расчеты не противоречат утверждению,

КОСМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ том 49 № 4 2011

что большая часть энергии вспышки на второй стадии события может являться трансформированной энергией падающего вещества протуберанца.

В процессе развития мощных солнечных событий, могут реализовываться, по крайней мере, два сценария: вспышка, сопровождающаяся выбросом корональной массы [1], либо вспышка, сопровождающаяся эрупцией возвратного протуберанца. Ранняя идентификация события (определение, какой из сценариев реализуется) может быть весьма полезной для оперативного прогноза состояния космической погоды. В случае реализации второго сценария с возвратным протуберанцем можно прогнозировать отсутствие, как минимум, яркого "ядра" коронального выброса массы в данном событии. При этом сценарии вторая пара вспышечных лент, обусловленная падением вещества протуберанца на хромосферу, оказывается существенно больше по площади, чем первая пара лент.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В работе предпринята попытка получить решение задачи, которая отличается, на первый взгляд, существенной неоднозначностью. Определив топологическое соответствие эмиссионных вспышечных структур различным типам вспышечных магнитных петель, согласно разрабатываемой авторами топологической модели [1], удалось обосновать разные варианты сценария развития события, сопровождающей хромосферную вспышку. В одном из вариантов сценария вспышка сопровождается выбросом КВМ с ярким "ядром", в другом случае – возвратным протуберанцем. Так, характерное развитие СКВЛ с их послетрансформацией во дующей вторую пару мощных вспышечных лент на второй стадии вспышки прямо свидетельствует о падении вещества эруптивного протуберанца на хромосферу. СКВЛ в данной ситуации являются хромосферными основаниями поднимающегося магнитного жгута – "каркаса" арочного эруптивного протуберанца. Образующаяся на второй стадии события на месте СКВЛ вторая пара вспышечных лент представляет собой основания того же самого магнитного жгута, но уже на стадии падения вещества эруптивного протуберанца.

В этой ситуации велика вероятность того, что КВМ не сформируется, либо сформируется КВМ без яркого "ядра". В первом случае выброшенное в межпланетное пространство плазменное облако не сможет достичь орбиты Земли, поскольку вещество и поле возвращаются обратно на Солнце. Отметим, кроме того, что данный вариант сценария позволяет объяснить феномен давно наблюдавшихся и описанных "четырехленточных вспышек" [10]. Если оценивать полную энергию события или мощность вспышки [18–20], исходя из площади хромосферных вспышечных лент и локального фотосферного магнитного поля активной области, то для данного класса событий справедливо делать такие оценки только на основе анализа развития первых, сравнительно небольших вспышечных лент на первой стадии вспышки. Энергия всего события, как показано выше, коррелирует с площадью небольших по размеру первых вспышечных лент. Рассчитываемая таким образом мощность вспышки будет невысока, сравнима с характерной мощностью вспышек оптических баллов 1 - S.

Таким образом, показано, что событие рассматриваемого класса (вспышка с возвратным протуберанцем), имеет в значительной степени локальный характер, общую энергетику, существенно уступающую энергетике наиболее крупных вспышек.

Другим результатом, позволяющим с точки зрения предложенной топологической модели делать заключения о протекающих в короне процессах высвобождения энергии в разных стадиях события, является интерпретация эволюции эмиссии СКВЛ – ВЛ2.

Во время первой стадии события, когда выброс вещества поднимается вверх, эмиссия оказывается сильнее на внешней стороне "овала" СКВЛ. К моменту окончания первой стадии вспышки область максимальной яркости эмиссии переместилась на изгиб "овала". На второй стадии события область максимальной эмиссии СКВЛ, как было показано ранее, переместилась на внутреннюю, ближайшую к первым вспышечным лентам (ВЛ1) сторону "овала", образовав мощные ВЛ2. Возникает логичное предположение, что эмиссия является указателем активных процессов, происходящих в пределах тех магнитных петель, которые опираются на данные участки хромосферы. Отсюда следует довод, что в объеме системы скрученных волокон (магнитного жгута) протуберанца процессы магнитного пересоединения идут во время быстрого роста высоты выброса на верхней поверхности объема, а во время падения вещества – на нижней поверхности. Так, при движении вещества вверх процессы магнитного пересоединения идут на верхней поверхности системы скрученных волокон. При обратном движении протуберанца, уже нижняя часть его петель испытывает столкновение с низкими вспышечными петлями, соединяющими ВЛ1. В месте их контакта и остановки падения магнитных петель протуберанца происходят активные процессы, ускоряющие частицы. Последние высыпаются на хромосферу вдоль силовых магнитных петель. Затем, следующая порция опускающихся петель останавливается в своем падении выше предыдущей части. Ускоренные при этом процессе частицы двигаются отсюда вдоль силовых линий поля, высыпаясь на хромосферу и

обеспечивая тем самым эффект видимого расхождения вспышечных лент ВЛ2. Так, топологическая модель события по развитию СКВЛ — ВЛ2 однозначно определяет локализацию мест магнитного пересоединения и энерговыделения в короне на разных стадиях события данного класса.

Суммируя вышесказанное, укажем основные результаты работы:

1. На основе топологической модели крупного солнечного события "вспышка-КВМ" [1] предложен новый сценарий развития события "вспышка с эруптивным возвратным протуберанцем", включающий две стадии развития, соответствующих подъему и падению протуберанца, причем обратное движение протуберанца является причиной дополнительного энерговыделения и формирования второй системы вспышечных лент.

2. Реализация сценария продемонстрирована на примере события на лимбе 18. VIII. 1995 г. и события на диске 23. IX. 1998 г.

3. Показано для события на диске 23.IX.1998 г., что энергия возвратного протуберанца, обязанная своим происхождением первичному энерговыделению в первой стадии вспышки, может обеспечить энерговыделение вспышки во второй стадии.

4. Предложен наблюдательный хромосферный критерий возврата эруптивного протуберанца в солнечном событии, включающем мощную вспышку на диске, по соответствующему развитию структур на концах вспышечных лент (СКВЛ), а именно: СКВЛ, наблюдаемые на первой стадии события, трансформируются во вторую пару вспышечных лент (ВЛ2) на второй стадии события.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки в рамках проекта РНП.2.2.3.1/198, а также при поддержке научной школы "Физика солнечных процессов и явлений и создание новых методов их изучения" НШ-4741.2006.2.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Сидоров В.И., Язев С.А. Топологическая модель солнечного события, включавшего вспышку и корональный выброс массы 19 октября 2001 года // Космич. исследования. 2008. Т. 46. № 4. С. 329–335. (Cosmic Research. Р. 320).
- Банин В.Г., Федорова А.С. Сильная хромосферная вспышка 5 ноября 1970 г. // Исследования по геомагнетизму, аэрономии и физике Солнца. Иркутск: СибИЗМИР АН СССР, 1971. Вып. 2. С. 73.
- 3. *Филиппов Б.П.* Эруптивные процессы на Солнце. М.: Физматлит, 2007. С. 134.
- 4. Solar Geophysical Data prompt reports. № 613 Part 1, 1995. P. 28.
- Сидоров В.И. Соотношение энергетики вспышки и коронального выброса массы 19 октября 2001 г. // Солнечно-земная физика. Вып. 8(121). Институт солнечно-земной физики РАН. Новосибирск: Издательство СО РАН, 2004. С. 71–72.

- Asai A., Masuda S., Yokoyama T. et al. Difference Between Spatial Distributions of the H_α Kernels and Hard X-Ray Sources in a Solar Flare // Astrophys. J. 2002. V. 578. L91–L94.
- Altyntsev A. T., Sych R.A., Grechnev V.V. et al. Flare of September 23, 1998: relation between temporal and spatial structures // Solar Physics. 2002. V. 206. P. 155.
- Kotrč P., Karlicky M., Kupryakov Y.A. et al. Physical Characteristics of the September 23, 1998 Solar Flare // Magnetic Fields and Solar Processes / Ed. Wilson A. Noordwijk, ESA Publications Division. 1999. P. 841–845. [Ninth European Meeting on Solar Physics. Florence (Italy), 12–18 September, 1999].
- Кулагин Е.С., Папушев П.Г., Чупраков С.А. Анализ явлений, наблюдавшихся в процессе развития вспышки балла 3В 23 сентября 1998 года по фильтрограммам в линии HeI 10830 // Исследования по геомагнетизму, аэрономии и физике Солнца. 2001. Вып. 113. Труды конференции, посвященной памяти Г.В. Куклина. С. 109–118.
- Мишин В.М., Сидоров В.И., Григорьев В.М. и др. Вспышка 23 сентября 1998 г.: новые аргументы в пользу модели СЅНКР // Исследования по геомагнетизму, аэрономии и физике Солнца. 2001. Вып. 113. Труды конференции, посвященной памяти Г.В. Куклина. С. 120–126.
- 11. *Portier-Fozzani F., Inhester B.* 3D Coronal Structures and their Evolutions Measured by Stereoscopy, Consequences for Space Weather and the Stereo Mission // Space Science Reviews. 2001. V. 97. P. 51–54.
- 12. *Isobe H., Yokoyama T., Shimojo M. et al.* Reconnection Rate in the Decay Phase of a Long Duration Event Flare on 1997 May 12 // Astrophys. J. 2002. V. 566. P. 528.
- Ohyama M., Shibata K. Preflare Heating and Mass Motion in a Solar Flare Associated with Hot Plasma Ejection: 1993 November 11 C9.7 Flare // Publ. Aston. Soc. Japan. 1997. V. 49. P. 249–261.
- 14. *Spitzer L.* Physics of Fully Ionized Gases. New York: Interscience, 1962. P. 144.
- Sylwester J., Garcia H.A., Sylwester B. Quantitative Interpretation of GOES Soft X-Ray Measurements. I. The Isothermal Approximation: Application of Various Atomic Data // Astron. Astrophys. 1995. V. 293. P. 577–585.
- Thomas R.G., Starr R., Crannell C.J. Expressions to Determine Temperatures and Emission Measures for Solar X-Ray Events from GOES Measurements // Solar Phys. 1985. V. 95. P. 323–329.
- 17. *Priest E.R.* Solar Magnetohidrodynamics. Moscow: Mir, 1985. P. 99.
- Сидоров В.И., Мишин В.И., Коваленко В.А. и др. Расчет мощности солнечных вспышек и их гелиофизические проявления // Актуальные проблемы физики солнечной и звездной активности. Материалы конференции стран СНГ и Прибалтики 2–7 июня 2003 г. Нижний Новгород, 2003. С. 422–425.
- 19. *Sidorov V.I., Sedykh P.A., Mishin V.M.* Estimating the Power of Magnetospheric Substorms and Solar Flares in the Context of their Unified Scenario // Proc. ICS 5, St. Petersburg, Russia, 16–20 May 2000, ESA SP 443. P. 573–576.
- Mishin V.M., Sidorov V.I., Adelkhanov S.S. et al. On the Power of Large Solar Flares // Romanian Astronomical Journal. 1999. V. 9. Supplement. P. 49–55.

КОСМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ том 49 № 4 2011