



№ 10 (65), 2011
ОКТЯБРЬ

НАУКА@ ТЕХНИКА

Science & Technology



МиГ-31
САМОЛЕТ XXI ВЕКА?



ЯГУАР
ПРОСТО О СОВЕРШЕННОМ



СТАНЦИЯ НА ЛЬДУ
«СЕВЕРНЫЙ ПОЛЮС-1»



ПЕРВЫЕ ЛЕДОКОЛЫ
РОССИИ



КОГДА
ВСПЫХИВАЕТ **СОЛНЦЕ**

Сомов Б.В.

КОГДА ВСПЫХИВАЕТ СОЛНЦЕ

Во время большой вспышки поток жесткого электромагнитного излучения Солнца возрастает во много раз. В невидимых для нас ультрафиолетовых (УФ), рентгеновских и гамма-лучах наше светило становится ярче тысячи солнц. Излучение достигает орбиты Земли через восемь минут после начала вспышки. Через несколько десятков минут приходят потоки заряженных частиц, ускоренных до гигантских энергий, а через двое-трое суток — огромные облака солнечной плазмы. К счастью, озоновый слой атмосферы Земли защищает нас от опасного излучения, а геомагнитное поле — от частиц. Однако даже на Земле, тем более в космосе, солнечные вспышки опасны и необходимо уметь их заблаговременно прогнозировать. Что же такое солнечная вспышка, как и почему она возникает?

СОЛНЦЕ И МЫ

Ближайшая к нам звезда — Солнце — родилась около 5 млрд. лет тому назад. Внутри нее идут ядерные реакции, благодаря которым существует жизнь на Земле. Построенные на основе современных наблюдений теоретические модели строения и эволюции Солнца не оставляют сомнений в том, что оно будет сиять еще миллиарды лет.

Солнечное излучение — главный источник энергии для земной атмосферы. Фотохимические процессы в ней особенно чувствительны к жесткому УФ-излучению, которое вызывает сильную ионизацию. Поэтому когда Земля была молодой, жизнь существовала только в океане. Позднее, примерно 400 млн. лет назад, появился озоновый слой, поглощающий ионизирующее излучение, и жизнь вышла на сушу. С тех пор озоновый слой защищает нас от разрушительного воздействия жесткого УФ-излучения.

Магнитное поле Земли, ее магнитосфера препятствует проникновению к Земле быстрых заряженных частиц солнечного ветра. Когда его порывы взаимодействуют с магнитосферой, часть частиц все-таки высыпается вблизи магнитных полюсов Земли, порождая полярные сияния.

Увы, гармонию наших отношений с Солнцем нарушают солнечные вспышки.

ВСПЫШКИ НА СОЛНЦЕ

Огромный интерес к вспышкам на Солнце не случаен. Большие вспышки оказывают сильное воздействие на околоземное космическое пространство. Потоки частиц и излучения опасны для космонавтов. Кроме того, они могут повредить электронные приборы космических аппаратов, нарушить их работу.

УФ- и рентгеновские лучи от вспышки внезапно увеличивают ионизацию в верхних слоях атмосферы Земли, в ионосфере. Это может приводить к нарушениям радиосвязи, сбоям в работе радионавигационных приборов кораблей и самолетов, радиолокационных систем, длинных линий электроснабжения. Частицы высоких энергий, проникая в верхнюю атмосферу Земли, разрушают озоновый слой. Содержание озона уменьшается из года в год. Научную дискуссию вызывает вопрос о вероятной связи вспышечной активности Солнца с климатом на Земле.

Ударные волны и выбросы солнечной плазмы после вспышек сильно возмущают магнитосферу Земли, вызывают магнитные бури. Важно, что возмущения магнитного поля на поверхности Земли могут влиять на живые организмы, на состояние биосферы Земли, хотя это воздействие кажется пренебрежимо малым по сравнению с другими факторами нашей повседневной жизни.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ВСПЫШЕК

Необходимость прогнозирования солнечных вспышек возникла давно, но особенно остро в связи с пилотируемыми космическими полетами. Долгое время почти независимо и практически безрезультатно разрабатывались два подхода к решению этой проблемы. Их можно условно назвать синоптическим и каузальным (причинным). Первый — сходный с предсказаниями погоды — базировался на изучении морфологических особенностей предвспышечных ситуаций на Солнце. Второй метод подразумевает знание физического механизма вспышки и, соответственно, распознавание предвспышечной ситуации путем ее моделирования.

До начала космических исследований, на протяжении многих лет, наблюдения вспышек велись преимущественно в оптическом диапазоне электромагнитного излучения: в линии водорода и в «белом свете» (непрерывном спектре видимого излучения). Наблюдения в магниточувствительных линиях позволили установить тесную связь вспышек с магнитными полями на поверхности Солнца (фотосфере). Часто вспышка видна как увеличение яркости хромосферы (слой непосредственно над

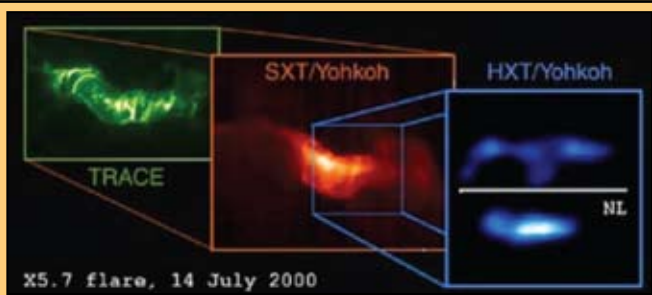


Рис. 1 — Солнечная вспышка (рентгеновский балл X5.7), зарегистрированная 14 июля 2000 г. со спутников «TRACE» и «Yohkoh». Видна аркада вспышечных петель: слева в УФ (195 А); в центре — в мягком рентгеновском излучении; справа — источники жесткого рентгеновского излучения (53–94 кэВ), расположенные вдоль вспышечных лент — основания аркады. NL — фотосферная нейтральная линия

фотосферой) в виде двух светящихся лент, расположенных в областях магнитных полей противоположной полярности. Радионаблюдения подтверждали эту закономерность, имеющую принципиальное значение для объяснения механизма вспышки. Однако его понимание оставалось на чисто эмпирическом уровне, а теоретические модели (даже самые правдоподобные) казались совершенно неубедительными.

Уже первые внеатмосферные наблюдения с помощью космических аппаратов показали, что солнечные вспышки представляют собой корональное, а не хромосферное явление. Современные многоволновые наблюдения Солнца с космических и наземных обсерваторий свидетельствуют о том, что источник энергии вспышки расположен над аркадой вспышечных петель (светлые полосы на рисунке слева) в короне, наблюдаемых в мягком рентгеновском и УФ-излучении. Аркады опираются на хромосферные вспышечные ленты, которые расположены по разные стороны линии раздела полярности фотосферного магнитного поля, или фотосферной нейтральной линии.

ЭНЕРГИЯ ВСПЫШКИ

Солнечная вспышка — самое мощное из всех проявлений активности Солнца. Энергия большой вспышки достигает $(1-3) \times 10^{32}$ эрг, что приблизительно в сто раз превышает тепловую энергию, которую можно было бы получить при сжигании всех разведанных запасов нефти и угля на Земле. Эта гигантская энергия выделяется на Солнце за несколько минут и соответствует средней (за время вспышки) мощности 10^{29} эрг/с. Однако это меньше сотых долей процента от мощности полного излучения Солнца в оптическом диапазоне, равной 4×10^{33} эрг/с. Она называется солнечной постоянной. Поэтому при вспышке не происходит заметного увеличения светимости Солнца. Лишь самые большие из них можно заметить в непрерывном оптическом излучении.

Откуда и как черпает свою огромную энергию солнечная вспышка?

Источник энергии вспышки — магнитное поле в атмосфере Солнца. Оно определяет морфологию и энергетику той активной области, где произойдет вспышка. Здесь энергия поля много больше, чем тепловая и кинетическая энергия плазмы. Во время вспышки происходит быстрое превращение избыточной энергии поля в энергию частиц и изменения плазмы. Физический процесс, обеспечивающий такое превращение, называется магнитным пересоединением.

Что такое пересоединение?

Рассмотрим простейший пример, который демонстрирует явление магнитного пересоединения. Пусть два параллельных проводника расположены на расстоянии $2l$ друг от друга. По каждому из проводников течет электрический ток. Магнитное поле этих токов состоит из трех различных магнитных потоков. Два из них — Φ_1 и Φ_2 — принадлежат соответственно верхнему и нижнему токам; каждый поток охватывает свой проводник. Они расположены внутри сепаратрисной линии поля A_1A_2 (сепаратрисы), которая образует «восьмерку» с точкой пересечения X . Третий поток расположен вне сепаратрисной линии. Он принадлежит одновременно обоим проводникам.

Если мы сместим оба проводника в направлении друг к другу на величину dl , то магнитные потоки перераспределятся. Собственные потоки каждого из токов уменьшатся на величину $d\Phi$, а их общий поток увеличится на ту же величину (объединенный поток Φ_1' и Φ_2'). Этот процесс называется пересоединением линий магнитного поля, или просто магнитным пересоединением. Он осуществляется следующим образом. Две линии поля подходят к точке X сверху и снизу, сливаются с ней, образуя новую сепаратрису, и затем соединяются так, чтобы образовать новую линию поля, которая охватывает оба тока.

Отметим, что такое пересоединение в вакууме при всей его простоте — реальный физический процесс. Его можно легко воспроизвести в лаборатории. Пересоединение магнитного потока индуцирует электрическое поле, величину которого можно оценить, разделив величину $d\Phi$ на характерное время процесса пересоединения dt , то есть время движения проводников. Это поле будет ускорять заряженную частицу, помещенную вблизи точки X , точнее говоря, линии X .

Плазма солнечной короны отличается от вакуума очень высокой электрической проводимостью. Как только появляется индуцируемое пересоединением электрическое поле E , оно сразу же порождает электрический ток, направленный вдоль линии X . Он приобретает форму токового слоя, который препятствует процессу пересоединения. В плазме высокой проводимости токовый слой делает пересоединение между взаимодействующими

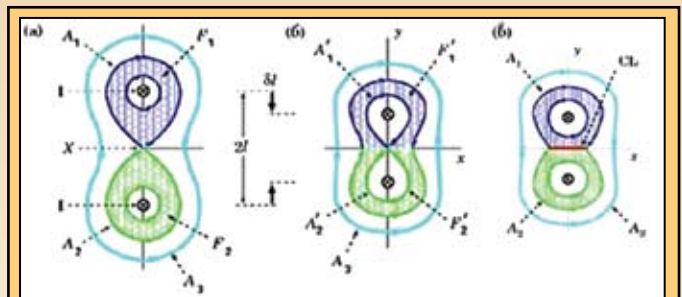


Рис. 2 — Магнитное поле двух параллельных электрических токов одинаковой величины I : а) в начальный момент времени; A_1A_2 — сепаратриса; $\Phi_1\Phi_2$ — магнитный поток до пересоединения; A_3 — линия поля общего магнитного потока двух токов; б) после смещения проводников на расстояние dl друг к другу. A_1A_2 — новая сепаратриса; $\Phi_1\Phi_2$ — пересоединенный магнитный поток. Он стал общим потоком двух токов; линия X проходит перпендикулярно плоскости рисунка; в) магнитное пересоединение в плазме. Показано промежуточное (предвспышечное) состояние с непересоединяющим (медленно пересоединяющим) токовым слоем CL

щими магнитными потоками очень медленным. Это приводит к тому, что значительная часть энергии взаимодействия накапливается в виде избытка магнитной энергии, а именно — магнитной энергии токового слоя.

ТОКОВЫЕ СЛОИ И ВСПЫШКИ

В общем случае пересоединяющий токовый слой представляет собой магнито-плазменную структуру, как минимум, двумерную и, как правило, двухмасштабную, поскольку втекание плазмы в слой и вытекание из него осуществляются в ортогональных направлениях. Обычно (особенно в условиях сильного магнитного поля) ширина слоя (2b) много больше его толщины (2a). Это важно, поскольку чем шире токовый слой, тем большую энергию он может накопить в области взаимодействия магнитных потоков. Между тем чем толще слой, тем больше скорость диссипации (потери) накопленной энергии. Эти фундаментальные свойства пересоединяющего токового слоя составляют основу модели солнечной вспышки, предложенной выдающимся российским астрофизиком С.И. Сыроватским (1925-1979).

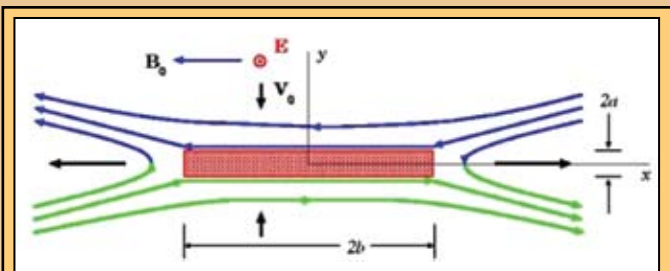


Рис. 3 — Простейшая модель пересоединяющего токового слоя — нейтральный слой. 2b — ширина слоя; 2a — толщина слоя; стрелками показаны направления втекания плазмы в слой и вытекания из него

В реальных трех измерениях только в последние десятилетия, благодаря космическим исследованиям Солнца, стала понятна роль топологических свойств крупномасштабных магнитных полей и кинетических плазменных явлений, вовлеченных в процесс пересоединения во вспышках.

«РАДУГА» И «МОЛНИИ» НА СОЛНЦЕ

Первоначально взаимодействие магнитных потоков в атмосфере Солнца рассматривалось исключительно как результат всплывания нового магнитного поля из-под фотосферы в корону. Новый магнитный поток, поднимаясь в солнечной атмосфере, взаимодействует со старым, предшествующим магнитным потоком. В действительности, взаимодействие магнитных потоков в атмосфере Солнца — гораздо более общее явление. В 1985 г. автор статьи предложил модель, которая связывает вихревые течения плазмы в фотосфере с появлением в короне особых линий магнитного поля — сепараторов. Сепаратор появляется над S-образным изгибом фотосферной нейтральной линии подобно радуге над изгибом реки. Такие изгибы весьма характерны для магнитограмм больших вспышек.

По структуре поля сепаратор отличается от линии X лишь тем, что содержит продольную составляющую магнитного поля. Наличие продольного поля $B_{||}$, разумеется, не запрещает процесс пересоединения. Эта составляющая всегда присутствует внутри и вне формирующегося вдоль сепарато-

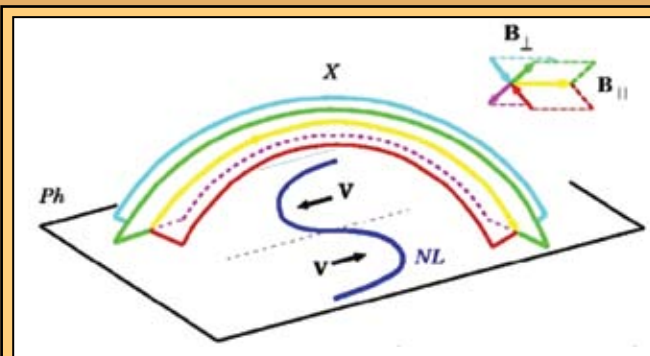


Рис. 4 — Модель магнитного поля активной области перед вспышкой. Особая линия магнитного поля — сепаратор (X) над S-образным изгибом фотосферной нейтральной линии (NL) подобен радуге над рекой. Вихревое течение со скоростью V в фотосфере деформирует фотосферную нейтральную линию так, что она приобретает форму буквы S. V_{\perp} — конвергентные фотосферные течения (направленные к нейтральной линии); $V_{||}$ — сдвиговые фотосферные течения (направленные вдоль нейтральной линии). В правом верхнем углу показана структура поля в окрестности сепаратора, вблизи его вершины: B_{\perp} — поперечные составляющие поля (перпендикулярные сепаратору), $B_{||}$ — продольная составляющая поля (направленная вдоль сепаратора)

ра пересоединяющего токового слоя. Она влияет на скорость пересоединения поперечных составляющих поля B_{\perp} и, следовательно, на мощность процесса преобразования энергии поля в тепловую и кинетическую энергии частиц. Это позволяет лучше понять и точнее объяснить особенности энерговыделения в солнечной вспышке.

Вспышка — быстрое магнитное пересоединение, которое подобно гигантской молнии вдоль «радуги» сепаратора. Оно связано с сильным электрическим полем (больше 10^{30} В/см) в высокотемпературном (более 10^8 К) турбулентном токовом слое (ВТТТС), несущем огромный электрический ток (порядка 10^{11} А).

ПЕРВИЧНОЕ ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЕ

Картина вспышки во всем ее многообразии и красоте — следствие первичного выделения энергии в ВТТТС. Наличие нескольких каналов выделения энергии в токовом слое (течения плазмы, тепловое и электромагнитное излучение, ускоренные частицы) определяет многообразие физических процессов, вызываемых вспышкой в атмосфере Солнца.

Пересоединенные линии магнитного поля вместе со «сверхгорячей» (электронная температура больше 3×10^7 К) плазмой и ускоренными частицами движутся из ВТТТС со скоростями порядка 10^3 км/с. Рентгеновский телескоп космической обсерватории «RHESSI» зафиксировал два источника жесткого рентгеновского излучения в короне во время вспышки 15 апреля 2002 г. Один из них находился высоко над солнечным лимбом. Его движение вверх соответствовало зарождению коронального выброса массы в межпланетное пространство. Этот выброс зарегистрировал коронограф на космическом аппарате «SOHO» 16 апреля 2002 г. Второй источник жесткого рентгеновского излучения находился под сепаратором. Пространственное распределение энергии жесткого рентгеновского излучения и, соответственно, пространственное распределение самых высоких температур во вспышке

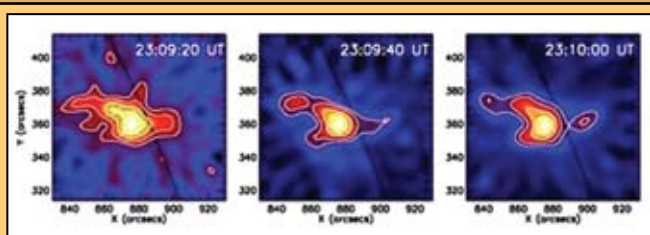


Рис. 5 — Вспышки 15 апреля 2002 г. Изображения получены рентгеновским телескопом на спутнике «RHESSI» в диапазоне энергий 10-25 кэВ, который соответствует тепловому излучению сверхгорячей плазмы:

а) непосредственно перед импульсной фазой; б) во время импульсного нарастания потока жесткого рентгеновского излучения; в) в максимуме интенсивности; движущийся вверх источник соответствует началу коронального выброса массы (СМЕ)

согласуются с предположением, что между источниками действительно находится пересоединяющий ВТТС.

«ВТОРИЧНЫЕ» ЭФФЕКТЫ ПОД РАДУГОЙ

Постепенно охлаждаясь, сверхгорячая плазма становится видимой в более мягком рентгеновском излучении. В области, расположенной под сепаратором, она движется вниз и встречается с другой «горячей» (электронная температура меньше или порядка 3×10^7 К) плазмой, которая быстро течет вверх, из хромосферы в корону.

Причина этого вторичного (но не второстепенного) течения в том, что мощные потоки тепла и ускоренных частиц из ВТТС быстро распростираются вдоль пересоединенных линий магнитного поля и моментально нагревают хромосферу по обе стороны от фотосферной нейтральной линии. Так образуются пары вспышечных лент, наблюдаемые в видимых хромосферных линиях и УФ-линиях переходного слоя между короной и хромосферой. Нагретые до высоких температур верхние слои хромосферы «испаряются» в корону. Эффект быстрого расширения нагретой хромосферной плазмы в корону хорошо виден в рентгеновских лучах. «Хромосферное испарение» (так называют это явление) вместе с плазмой, вытекающей из токового слоя, порождает аркады вспышечных петель: длинные или короткие.

Как уже отмечалось, в мягком рентгеновском и УФ-излучениях заключена значительная часть полной энергии вспышки, причем именно они воздействуют на верхние слои атмосферы Земли. Неудивительно, что огромные потоки этого же излучения воздействуют и на атмосферу Солнца: хромосферу и фотосферу, вызывая нагрев и дополнительную ионизацию солнечной плазмы. К сожалению, точности современных наблюдений пока не хватает для изучения столь тонких эффектов.

Изучение вторичных явлений имеет принципиальное значение для сравнения результатов теории вспышек с наблюдениями, поскольку видны больше всего именно следствия первичного энерговыделения: например, тормозное излучение ускоренных электронов в хромосфере делает вспышечные ленты видимыми в жестком рентгеновском излучении.

Оптическое излучение вспышки — часть сложного гидродинамического отклика хромосферы и фотосферы на импульсный нагрев мощными пучками заряженных частиц, потоками тепла и жесткого электромагнитного излучения. К сожалению, пока еще нет однозначных предсказаний теории, относящихся к оптическому излучению. Слишком сложна физическая картина «отклика». Успехи достигнуты лишь на пути численного моде-

лирования импульсного нагрева хромосферы электронными пучками. Расчеты на ЭВМ вскрыли специфические особенности импульсной фазы вспышки: формирование ударных и тепловых волн большой амплитуды, отличие электронной температуры от ионной, мощное УФ-излучение в линиях переходного слоя. Однако в целом, даже в рамках столь ограниченной постановки задачи об отклике, предстоит еще много сделать, чтобы обеспечить сравнение результатов расчетов и наблюдений.

Первые пространственные наблюдения гамма-излучения вспышек на космической обсерватории «RHESSI» показали, что

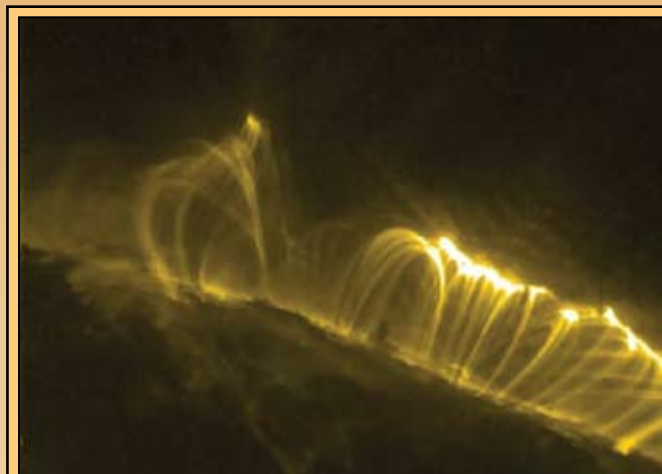


Рис. 6 — Гигантская солнечная вспышка (рентгеновский балл X17) 4 ноября 2003 г. Прекрасно видна аркада вспышечных петель в короне. Изображение в линиях крайнего ультрафиолетового излучения 171 А получено с помощью УФ-телескопа КА «TRACE»

ускоренные электроны и ускоренные ионы вторгаются в хромосферу в различных областях. Этот новый наблюдательный факт, хотя и требует дальнейшего детального изучения, в общих чертах согласуется с предположением о первичном ускорении частиц электрическим полем в пересоединяющем ВТТС. Положительно и отрицательно заряженные частицы ускоряются крупномасштабным электрическим полем в противоположные стороны и, соответственно, высыпаются из токового слоя в хромосферу вдоль различных линий магнитного поля. Аккуратные теоретические расчеты эффекта, к сожалению, пока отсутствуют.

ПЕРЕД ВСПЫШКОЙ

Что предшествует вспышке? В какой момент времени она происходит? Рассмотрим эти вопросы на примере модели «Радуга», разрабатываемой в отделе физики Солнца ГАИШ МГУ.

Начнем с процесса накопления энергии перед вспышкой. Главными факторами здесь являются медленные течения фотосферной плазмы, несущей магнитные поля. Фотосферные течения, направленные к нейтральной линии, принято называть конвергентными, а течения вдоль нее называются сдвиговыми.

Очевидно, конвергентные течения стремятся сжать фотосферную плазму и «вмороженное» в нее (движущееся вместе с плазмой) магнитное поле в окрестности нейтральной линии. Это приводит к формированию медленно пересоединяющего токового слоя вдоль сепаратора. При этом магнитное поле приобретает избыток магнитной энергии токового слоя. Сдвиговые течения в фотосфере растягивают линии магнитного поля в короне в направлении, параллельном сепаратору.

Суммарный избыток магнитной энергии в короне, создаваемый течениями плазмы в фотосфере, называют «свободной

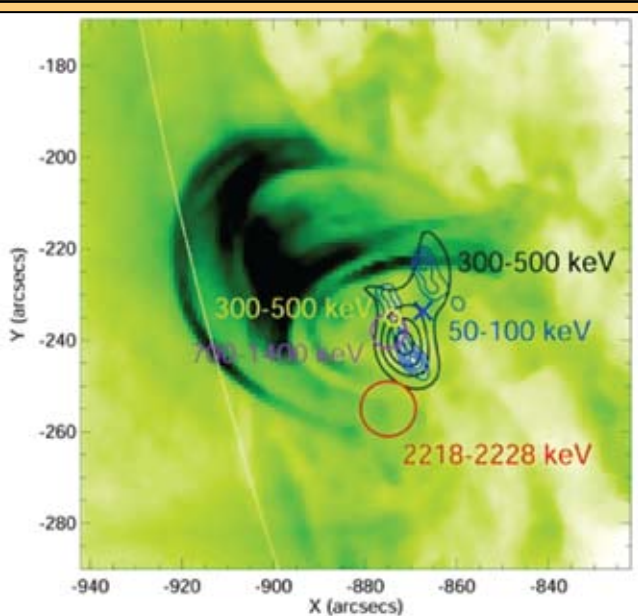


Рис. 7 — Вспышка, зарегистрированная 23 июля 2003 г. Положительно и отрицательно заряженные частицы разных энергий высыпаются из токового слоя в хромосферу в различных областях. Изображение получено в результате наложения снимков, сделанных КА «TRACE» и «RHESSI». Распределение зеленого фона дали УФ-наблюдения со спутника «TRACE» спустя 90 мин. после вспышки; видны послевспышечные петли в короне (черный цвет)

счет сдвиговых течений фотосферной плазмы, параллельных нейтральной линии.

Во время вспышки происходит быстрая «релаксация стрессов» магнитного поля в короне. Подобно тому, как спусковой крючок освобождает сжатую пружину, пересоединение при вспышке обеспечивает быстрое превращение накопленного в активной области на Солнце избытка энергии поля в тепловую и кинетическую энергию частиц.

ПЕРСПЕКТИВЫ ИЗУЧЕНИЯ ВСПЫШЕК

Изучение солнечных вспышек необходимо для создания научно обоснованного, надежного прогноза радиационной обстановки в ближнем космосе. В этом практическая задача теории вспышек. Важно, однако, и другое. Вспышки на Солнце необходимо изучать для понимания различных вспышечных явлений в космической плазме. В отличие от вспышек на других звездах, а также многих других аналогичных (или кажущихся аналогичными) нестационарных явлений во Вселенной, солнечные вспышки доступны самому всестороннему исследованию практически во всем электромагнитном диапазоне — от километровых радиоволн до жестких гамма-лучей. Физика солнечных вспышек — своеобразный разрез через многие области современной физики: от кинетической теории плазмы до физики частиц высоких энергий.

Современные космические наблюдения позволяют видеть появление и развитие солнечной вспышки в УФ- и рентгеновских лучах с высоким пространственным, временным и спектральным разрешением. Огромный поток наблюдательных данных о вспышках и вызываемых ими явлениях в атмосфере Солнца, межпланетном пространстве, магнитосфере и атмосфере Земли дает возможность тщательно проверять все результаты теоретического и лабораторного моделирования вспышек.

магнитной энергией». Именно она полностью или частично «освобождается» во время вспышки, точнее говоря, превращается из энергии поля в тепловую и кинетическую энергию частиц солнечной плазмы.

КАК ПРОИСХОДИТ ВСПЫШКА

В модели «Радуга» предполагается, что процесс быстрого пересоединения, то есть первичное энерговыделение во вспышке, начинается на сепараторе вблизи его вершины.

В процессе пересоединения первой пары линий поля создается новая линия. При этом происходит быстрое превращение соответствующей порции энергии магнитного поля в энергию частиц плазмы. Ускоренные частицы за очень короткое время долетают вдоль пересоединенной линии поля к ее основаниям в хромосфере. Здесь они отдают свою энергию: тормозятся и нагревают хромосферную плазму, порождая пару «ярких точек», называемых «вспышечные ядра эмиссии».

Быстрое пересоединение следующей пары линий магнитного поля создает другую линию поля и новую пару ярких точек. А наблюдателю на Земле или на космической станции кажется, что оба вспышечных ядра движутся друг к другу.

Реально во вспышке в процессе пересоединения участвуют, разумеется, не две линии поля, а два магнитных потока, которые взаимодействуют между собой не в одной точке, а вдоль всего сепаратора. Поэтому пересоединение порождает не две яркие точки в хромосфере, а две вспышечные ленты.

Модель «Радуга» объясняет наличие в наблюдаемой картине вспышки двух эффектов. Во-первых, вспышечные ленты в ходе вспышки должны двигаться в противоположные стороны от фотосферной нейтральной линии. Во-вторых, наиболее яркие участки вспышечных лент могут двигаться навстречу друг другу, если освобождается магнитная энергия, накопленная за

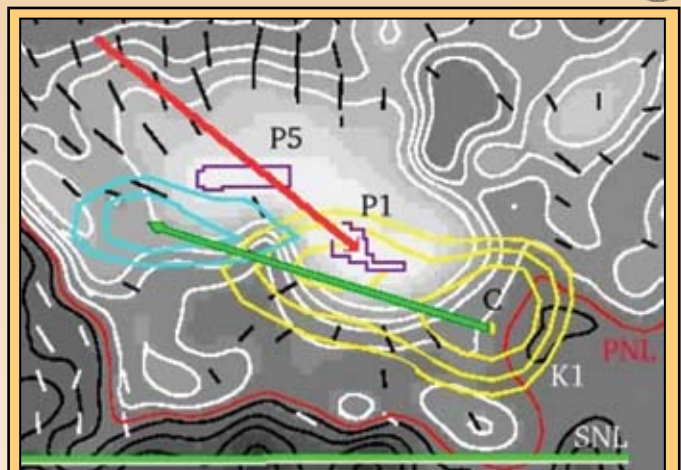


Рис. 8 — Вспышка (рентгеновский балл X5.7) 14 июля 2000 г. Показано положение наиболее яркого источника излучения, K1, в диапазоне 53-93 кэВ, по данным жесткого рентгеновского телескопа НХТ на спутнике «Yohkoh» в начале всплеска жесткого рентгеновского излучения. Желтые контуры и в конце (голубые контуры) всплеска жесткого рентгеновского излучения. Зеленая стрелка — смещение центра излучения С, за время всплеска порядка 20 с. Красной стрелкой показано движение самого большого солнечного пятна P1 в течение двух дней, предшествовавших вспышке. Оно складывается из двух частей: движение к упрощенной нейтральной линии SNL и движение вдоль нее