

АКТИВНЫЕ ОБЛАСТИ И ВСПЫШКИ

А.Т.Алтынцев, В.Г.Банин, С.И.Гопасюк, В.П.Максимов,
Б.В.Сомов, В.Е.Степанов, В.М.Томозов

ACTIVE REGIONS AND FLARES,

by A.T.Altynytsev, V.G.Banin, S.I.Gopasyuk, V.P.Maksimov,
B.V.Somov, V.E.Stepanov, V.M.Tomozov

The first part of this review presents the modern ideas of the origin, development and decay of active regions. Problems are formulated, which are of primary importance for furthering the study of active regions. The second section of the review relates to discussion of observed data and theoretical concepts of solar flares. We discuss also some outstanding scientific objectives, whose solution will permit a better understanding of the nature of solar flare phenomena.

I. Проблемы в исследовании активных областей

Понятие активная область (АО) включает комплекс образований: группу пятен и пор, фотосферные и хромосферные факелы, вспышки, выбросы, протуберанцы, корональные конденсации, магнитные поля и токовые системы в этих образованиях. Активная область порождает излучение во всем электромагнитном спектре и изучается в диапазонах спектра от радиоволн до гамма-квантов, а ее трехмерная пространственная структура прослеживается до сверхкороны Солнца. Активная область является наиболее сложным и устойчивым образованием и представляет собой явление, определяющее основную активность Солнца. Как показывают наблюдаемые структуры типа арок и петель, магнитные поля области образуют в основном замкнутые системы, однако часть силовых линий поля, особенно на позднем этапе развития области, становится открытой.

Наблюдения в ультрафиолетовом и рентгеновском излучении петельных структур /1,2/, неравенство магнитных потоков противоположных полярностей в развитых активных областях /3-5/, протяженность упорядоченных хромосферных структур до 30 000 км и более /6/, активизация волокон во время вспышки, наличие симпатических вспышек позволили заключить, что магнитные поля удаленных областей связаны одна с другой, образуя комплекс активных областей, а также связаны с активными областями в разных полушариях Солнца /7/. Поскольку такая сложная взаимосвязь наблюдается выше уровня фотосферы, она должна существовать и в подфотосферных слоях.

Однако характер развития активности полушарий Солнца свидетельствует о том, что магнитная связь между активными областями разных полушарий, по-видимому, не является существенной и доминирует их взаимосвязь в одном полушарии.

В последние полтора десятилетия совершенно изменились наши представления о характере распределения магнитных полей на поверхности Солнца. Обнаружено, что они локализованы в активных областях в дискретных элементах с большой концентрацией и напряженностью от 1000 до 2500 Гс /3,8-17/. В последнее десятилетие с развитием магнитографической техники и появлением новых мощных телескопов получены наблюдения, которые позволили это представление распространить и на спокойные области Солнца /18,19/.

Как рождается активная область? До появления поры в фотосфере наблюдается перегруппировка и возмущение гранул /20-22/, образование дорожек, которые несколько темнее межгранульного газа. Между дорожками отдельные гранулы ориентируются вдоль дорожек. Первым признаком появления поры является возникновение небольшой темной области размером примерно в одну секунду дуги. Вначале она мало отличается от межгранульного образования, но вскоре увеличивается в размерах и становится более темной. Если возникает вторая пора в хвостовой части, то эти две поры соединяются узкой дорожкой темного газа /23/. Если рядом возникают две или более пор одной полярности магнитного поля, то обычно происходит их объединение. Часто новая активная область возникает в окрестности старой активной области, магнитное поле которой претерпевает изменение за три дня до появления пятна. Появляются магнитные "холмы", напряженность поля которых значительно превышает поле старой области. О балансе потоков противоположной полярности имеются противоречивые мнения /24,25/.

Перед образованием пятен по нулевой линии $H_{\parallel}$ наблюдается сильное трансверсальное поле /24/. Выход в фотосферу магнитного поля новой группы сопровождается уменьшением потока старых магнитных полей /26/. В период рождения АО усиливается подъем фотосферного газа в области слабых магнитных полей. В области сильных полей увеличивается поток опускающегося газа /27/. Скорость падения, определенная по линии $Na D1$, достигает 1,5 км/с, продолжительность опускания газа невелика — порядка одного часа /28/.

В хромосфере возникновение АО связано с упорядочением фибрилл, которые представляют собой области газа, защищенные магнитным полем. В хромосфере, и температура которых, по-видимому, определяется нагревом волнами, идущими снизу /29/. Количественный расчет этих процессов еще не выполнен. Одновременно с упорядочением фибрилл, а в редких случаях после этого, появляется поярчение в хромосфере в линиях H_{α} и H и $KCaII$, а также поглощение в линии $He I 10830\text{\AA}$. Степень поярчения в H_{α} примерно соответствует яркости субвспышки.

Границы флоккула расширяются в первые два часа со средней скоростью 2 км/с, а в последующие 5-6 часов скорость уменьшается до одного км/с /30-32/. Активная область на уровне хромосферы появляется в виде системы арочных волокон (AFS) /33-36/, которые определяются выходом магнитного поля в виде отдельных трубок (AFR). С появлением АО обнаруживается перестройка в ориентации темных волокон (фибрилл). Первая арка AFS появляется под некоторым углом θ к оси группы, последующие арки возникают при меньших углах θ и в дальнейшем превращаются в систему почти параллельных темных дуг /37/, связывающих области различной магнитной полярности. В торцах этих дуг вещество движется вниз, а вершина арочной системы поднимается вверх /36/. Явление изменения наклона всплывающих трубок говорит о наличии скрученности жгута магнитного поля. Торцы арочной системы возникают на границах хромосферной сетки и поры развиваются в местах расположения торцов арки /30,31,35,25,38-41/. Сейчас твердо установлено, что в супергрануле вещество движется от ее центра к периферии, но имеются работы, показывающие отсутствие опускания газа на границах супергранулы /42-44/. Поэтому обычно изображаемая картина конвекции в супергрануле подвергается серьезным атакам наблюдателей. Из подсчета числа возникающих волокон, а их количество обычно порядка нескольких сотен, была определена величина магнитного потока в отдельной трубке, которая оказалась равной 10^{19} макс /31/. Образование пятна происходит при скачкообразном возрастании магнитного потока.

Локальные источники радиоизлучения в сантиметровом и дециметровом диапазонах спектра связаны с факелами и пятнами. Это — так называемая S -компонента радиоизлучения. Исследования /45/ показали, что S -компонента появляется иногда за 2–3 дня до возникновения флоккула. В 30% случаев появление S -компоненты на один день опережало появление флоккула и в то же время в линии H_{α} наблюдались структуры, указывающие на наличие арок. Таким образом, появление S -компоненты радиоизлучения связано с выходом магнитного поля в корону.

О появлении активной области в верхней хромосфере и короне свидетельствует также возникновение эмиссии в ультрафиолете и мягком рентгене. Спустя несколько часов после появления системы арочных волокон в H_{α} в ультрафиолетовых и рентгеновских лучах появляются яркие точки и площадки, которые принимают затем форму овалов, большая полуось которых ориентирована перпендикулярно линии $H_{\alpha} = 0$ в фотосфере /46,47/. Непосредственные наблюдения /48/ показывают, что в мягкой рентгеновской области с $\lambda > 1\text{Å}$ 50% эмиссии возникает на высотах ниже 20 тыс. км, а 90% ее образуется ниже 60 тыс. км. Пространственные и временные характеристики структур в ультрафиолетовой области спектра зависят от температуры образования спектральных линий. Так, в развитой АО в линии $Ne\text{ III } \lambda\ 465\text{Å}$ ($T = 5 \cdot 10^5\text{K}$) проявляется нижняя часть корональных трубок, а в линии $Fe\text{ XV } \lambda\ 284\text{Å}$ ($T = 2 \cdot 10^6\text{K}$) уже наблюдается замкнутая структура трубок — петель, имеющих более диффузный вид. В $Ne\text{ III}$ отдельные заостренные структуры имеют длину 10^4 – 10^5 км и относительно короткую продолжительность жизни — порядка 30 минут. В линии $Fe\text{ XV}$, структура более протяженная и имеет продолжительность жизни в несколько дней /49/. Возникает вопрос, каково расположение ярких точек в рентгеновском диапазоне относительно хромосферной сетки. В первый момент рождения АО трудно отличить яркие точки от тех, которые связаны с выходом магнитных полей эфемерных областей, имеющих среднюю продолжительность жизни ~ 8 часов и расположенных произвольно относительно хромосферной сетки. Однако яркие образования в мягких рентгеновских лучах, которые связаны с развивающейся АО, располагаются на границах хромосферной сетки или вблизи нее /50/. Возникает альтернатива — определяет ли граница хромосферной сетки условия возникновения АО или хромосферная сетка формируется уже вследствие выхода магнитного поля в атмосферу Солнца, поскольку имеются свидетельства о скорости распространения деформации ячеек до расстояния 200 тыс. км от центральной части АО /51/. Поскольку продолжительность жизни хромосферной сетки порядка 22 часов, а появление S -компоненты в радиоизлучении иногда происходит за несколько дней до возникновения АО, то, по-видимому, последний вывод является более вероятным.

Открытие корональных петельных структур поставило целый ряд проблем, от решения которых зависят наши представления о природе активной области. Эти проблемы можно разделить на две группы: проблемы, относящиеся к природе корональных петель, и проблемы взаимосвязи петель с другими явлениями в АО. Время жизни петель (от получаса до нескольких дней) значительно превышает время радиационного охлаждения, а следовательно, петли являются относительно устойчивыми образованиями.

В ряде работ /52–56/ исследовался тепловой баланс корональных петель. В большинстве этих исследований давление предполагалось однородным, а это предположение применимо только к нижележащим петлям и то условно. Для более высоких петель рассматривались стационарное сифонное, изотермическое и адиабатическое течения, вызываемые разностью давлений между основаниями

петли /57,58/. Однако наблюдения показывают, что в обоих торцах петель имеет место нисходящее движение. Поэтому остается открытым вопрос о том, как происходит инжекция плазмы в петлю через поперечное магнитное поле. Теоретические исследования сдерживаются недостатком наблюдательных данных с хорошим пространственным разрешением ($\sim 1''$) в рентгеновской и ультрафиолетовой областях спектра.

В настоящее время нет единого мнения о внутренней структуре петель. Так, было представлено /59,60/ об относительно холодной плазме вдоль оси петли, наблюдаемой в линиях *C II*, *O III*, *C IV* и *Ne VIII*, с радиальным ростом температуры вдоль радиуса. Цилиндрическая петля как бы окружена горячей оболочкой, наблюдаемой в линиях *Mg X* и *Si XII*. Такова интерпретация наблюдательных данных, полученных на станции „Скайлаб“. С борта этой же станции с разрешением $2''$ (14 августа 1979 г.) были получены изображения АО в мягком рентгеновском и ультрафиолетовом диапазонах. Детальные исследования этих изображений /61/ привели к следующим заключениям.

1. Горячие петли с $T > 10^6$ К смещены относительно холодных петель с $T < 10^6$ К.

2. Плотность плазмы в каждой холодной петле остается постоянной и не уменьшается с высотой, как это было бы при гидростатическом равновесии.

3. Внутри горячих петель давление плазмы на порядок больше, чем на периферии, а в вершинах петель имеет место более сильная эмиссия, что, по-видимому, связано с избытком вещества в этих областях.

4. Петли окружены диффузным газом с температурой $(1 \pm 2) \cdot 10^6$ К.

Таким образом, вне корональных дыр, которые связаны с открытыми структурами магнитного поля, корона в высшей степени неоднородна и состоит из петельных горячих и холодных конфигураций, образующих активные области в короне и связывающие активные области между собой /62-64/. Равновесие горячих петель также требует наличия азимутальной компоненты магнитного поля.

В 1973 г. была обнаружена эжекция большого количества массы в межпланетное пространство (до $6 R_{\odot}$), которая получила название транзиента /66-69/. Это явление проявляется в широком диапазоне спектра электромагнитного излучения. Временной масштаб каждого отдельного события составляет десятки минут. Структура транзиентов весьма разнообразна: петельные, капельные, в виде оболочки и т.д. Основные свойства этих образований таковы.

1. Плотность магнитной энергии превышает плотности кинетической и тепловой энергий примерно в 10 раз ($\beta < 1$) /70,71/.

2. Скорости транзиентов находятся в пределах 200-1000 км/с и они более или менее постоянны с высотой в пределах $2-5 R_{\odot}$ или слабо увеличиваются /72,73/.

3. Ширина транзиента линейно увеличивается с высотой /72/.

4. Напряженность магнитного поля на высоте $3 R_{\odot} \sim 1,7$ Гс /70/.

5. Электронная концентрация транзиента более чем на порядок превышает концентрацию плазмы в окружающей среде /73/.

6. Предвестником транзиента является небольшое повышение плотности в короне /74/.

7. Около 40% транзиентных явлений связано со вспышками, остальные — с эруптивными протуберанцами.

8. В среднем в течение месяца можно наблюдать 15 транзиентов.

9. Транзиенты вне активной области возникают вблизи $H_{\alpha} = 0$ на границах корональных дыр и их появление расширяет область, занятую корональной дырой /72/. Эти явления еще сравнительно мало изучены.

Большое число активных протуберанцев взаимодействует с пятнами. Вещество падает вдоль магнитных силовых линий под действием гравитации. Это должно приводить к значительной потере массы протуберанцем и, если не происходит ее пополнение, то в течение часа или менее протуберанец должен исчезнуть. Тем не менее активные протуберанцы типа солнечных пятен существуют несколько дней, при этом несколько изменяются их форма и размеры, все это указывает на существование баланса массы. Неясно, как накапливается это вещество, хотя подразумевается конденсация его в короне. Однако в протуберанце находится непомерно большая часть вещества короны /75/. Пути решения этой трудности могут заключаться в пополнении вещества выбросами или постулением в протуберанец больших потоков заряженных частиц. В том и другом случаях инжекция частиц снизу должна быть канализована.

Столь же не решена проблема переноса энергии в протуберанцах, учитывая, что его отдельные волокна имеют размеры $1''$ и меньше. Необходимо определить радиальное и осевое изменения температуры и плотности для отдельных волокон, а также теплопроводные потоки и радиационные потери энергии. Интерпретация устойчивости и динамики разнообразных форм протуберанцев связана с серьезными трудностями.

Когда активная область уже созрела, необходимо определить структуру магнитного поля в отдельных пятнах АО. Наиболее важным вопросом является проблема существования в пятнах спиральной структуры поля. Имеется много исследований, которые подтверждают наличие такой структуры. Анализ поворотов поперечных магнитных полей /76-78/ подтверждает вращение поля с глубиной. Вращение определяется по различным магниточувствительным линиям поглощения с различными глубинами образования и по записям поля в разных участках контура одной и той же линии. Если существует скрученная структура поля, то вращение поперечной компоненты поля для лидера и хвостового пятна должно быть противоположным. Это было подтверждено в /78/, однако на малом наблюдательном материале. Но важно установить и скрученность в одном направлении. Это будет указанием на нестационарность процесса скручивания, на его увеличение или уменьшение. Вращение пятен, по-видимому, также свидетельствует о спиральной структуре магнитных полей. Хотя, если на определенной стадии развития АО магнитное поле пятна не поднимается, то вращение пятна создает спиральную структуру магнитного поля АО /79/. Иногда в жгуте магнитного поля, образующем пару пятен, наблюдаются крутильные колебания /80/. Скорости вращения пятен находятся в пределах $0,2-1$ км/с /78, 81-84/. Кроме того, обнаружено слабое увеличение скорости вращения с глубиной /78/, что, однако, не подтвердилось в других работах /84/. К сожалению, исследования вращения пятен носят эпизодический характер. Таким образом, имеется целый ряд наблюдений, свидетельствующих о спиральной жгutowой структуре магнитного поля. Трубки магнитного поля сплетены в одно целое. Однако остается неясным, что представляет собой отдельная трубка, имеется ли в каждой трубке скрученность поля.

При распаде АО в окрестности пятен появляется кольцевая зона с очень ослабленным полем и размерами $10000-20000$ км вдоль края пятна, шириной ~ 10000 км. Эта зона была названа рвом. Внутри этого рва обнаружены магнитные образования /14, 85, 86/, движущиеся от пятен со скоростями $0,5-1,0$ км/с, которые, достигая внешней границы рва, исчезают. Магнитные движущиеся образования (МДО) имеют биполярную структуру, отражающую наличие петли магнитного поля. Передний торец МДО имеет полярность, противоположную полярности пятна. Предполагается, что МДО — это трубка магнитного поля, отпочковываю-

щаяся от пятна, которая может иметь несколько пересечений с фотосферой, и тогда наблюдается серия следующих один за другим МДО. Иногда ведущая полярность МДО совпадает с полярностью пятна. Таким образом, как рождение активной области, так и ее структура в короне, а также модель АО показывают элементную волокнистую структуру мощных магнитных полей в активной области.

На стадии исчезновения АО происходит дробление холмов магнитного поля и их уменьшение, но скорости убывания поля N и S полярностей не одинаковы /27/. Имеет место вырождение активных областей в униполярные /65/ и найдено, что в тех случаях, когда результирующий поток поля всех пятен отличен от нуля, то полярность этого потока противоположна полярности фонового поля Солнца /87/. Возможно, что часть магнитного поля АО дает некоторый вклад в фоновое магнитное поле /88/. Но пока нет определенного ответа на вопрос, как исчезают магнитные потоки активной области. Процесс образования фоновых крупномасштабных полей миграцией МДО еще требует доказательств. Исчезновение полей АО путем погружения их вновь в подфотосферные слои противоречит явлению плавучести, хотя опускание их возможно, если плотность и температура вещества приобретут некоторые критические величины. Магнитный поток в солнечном ветре значительно меньше потока на поверхности Солнца.

Были высказаны гипотезы /89,90/, что магнитные поля АО распространяются по поверхности Солнца за счет турбулентной диффузии. Магнитные поля хвостовой части АО мигрируют к полюсам, создавая фоновые поля /91/. Однако сейчас имеются существенные возражения против этой идеи. Во-первых, жесткое и более быстрое вращение фоновых полей в отличие от дифференциального вращения АО свидетельствует о более глубоком их проникновении в подфотосферные слои /92/ и об отсутствии их связи с магнитными полями активной области. Во-вторых, время жизни концентрированных магнитных элементов значительно меньше, чем необходимо для перемещения их по солнечной поверхности на значительные расстояния /18/. В-третьих, имеются данные /93/, что в спокойных областях так же, как и в АО, магнитный поток всплывает на поверхность.

Не решена проблема баланса массы в АО. Исследование поля лучевых скоростей на уровне фотосферы и хромосферы показывает, что имеет место преобладание опускающегося потока массы над поднимающимся /32,94-96/. Исследования поля скоростей и концентрированных магнитных полей показали, что последние всегда связаны с нисходящим потоком газа /10,97-99/. Сейчас остается открытым вопрос, имеет ли поле скоростей такую же тонкую структуру, как и магнитное поле, и где находятся источники, восполняющие потерю масс в верхних слоях атмосферы Солнца.

После краткого обзора состояния изученности активных областей можно сформулировать четыре фундаментальных проблемы.

1. Эволюция активной области: рождение, развитие и ее гибель.
2. Тонкая структура отдельных образований активной области.
3. Перенос и баланс энергии и массы в различных структурных элементах активной области.
4. Взаимосвязь активных областей, образование комплексов АО и их связь с фоновыми полями.

Эволюция активной области

1. Несмотря на обширное количество исследований, отсутствуют комплексные наблюдения, которые прослеживали бы эволюцию активной области на всех уровнях атмосферы Солнца и во всех диапазонах электромагнитного спектра. Если мы кое-что знаем о последовательном проникновении магнитных полей во

все более высокие слои атмосферы и о сопутствующем этому проникновению явлениям, то почти ничего не знаем о последней фазе развития АО — ее гибели.

2. Необходимо выяснение динамических и физических условий рождения АО на границах супергранулы. Возможно, что с всплыванием магнитного потока происходит перестройка супергранул и хромосферных сеток, а выход поля определяет первоначальное их размещение.

3. Необходимы определения физических условий, величины магнитного поля и характеристик поля скоростей в темных фотосферных дорожках.

4. Требуются исследования магнитных движущихся образований как в период роста активной области (*MFI*), так и на фазе ее гибели (*МДО*).

5. Изучение в ультрафиолетовом и рентгеновском диапазонах эволюции корональных структур АО в связи с эволюцией магнитных полей и их перемещением на поверхности Солнца.

6. Исследование токовых систем на различных уровнях атмосферы Солнца.

7. Разработка методов построения пространственной структуры непотенциальных магнитных полей, исходя из наблюдений на уровне фотосферы.

8. Решение проблемы исчезновения магнитных потоков активных областей. Происходит ли их дробление вследствие неустойчивости, а затем полная диссипация, переходят ли они в форму крупномасштабных магнитных полей, опускаются ли они в подфотосферные слои или покидают атмосферу Солнца? Требуется определение роли этих процессов в гибели АО.

Тонкая структура отдельных образований активной области

1. Исследование структуры концентрированных магнитных полей, их размеры и напряженность магнитного поля, характеристик поля скоростей в этих образованиях на всех фазах развития этих образований.

2. Исследование тонкой структуры хромосферных образований: фибрилл, систем арок волокон в хромосфере, петельных структур в короне и в переходной области от хромосферы в корону. Исследование в ультрафиолетовой и рентгеновской областях спектра внутренней структуры и физических параметров горячих и холодных корональных петель, их равновесия и устойчивости, а также изучение структуры корональных конденсаций.

Перенос и баланс энергии и массы в различных структурных образованиях активной области

1. Наблюдения корональных линий в оптическом диапазоне и в переходной области в ультрафиолетовых лучах показали, что наблюдаемые полуширины линий значительно превосходят их тепловые полуширины. Задачи на будущее: определить, какие виды колебаний приводят к нагреву хромосферы, переходной области и короны, установить локализацию источника нагрева. В связи с этим нужно выяснить, происходит ли диссипация механической энергии, переносимой из конвективной зоны, или осуществляется диссипация энергии магнитного поля.

2. Решить проблему, связанную с наблюдаемым избытком падающего потока газа из верхних уровней атмосферы Солнца. Установить каналы накопления газа в протуберанцах, арочных волокнах и петельных структурах.

3. Необходимо исследовать эволюцию транзиентов, для чего особенно важно получение данных на небольших высотах в короне, ниже $1,5 R_{\odot}$.

4. Требуется выяснить различия в физических параметрах транзиентов, связанных со вспышками и эруптивными протуберанцами.

5. Для уточнения величины напряженности поля в транзиентах необходимо установить природу и механизм радиоизлучения транзиентов, а также определить геометрию магнитного поля в различных типах этих явлений.

1. Здесь необходимо продолжение исследований в ультрафиолетовой и рентгеновской областях спектра протяженных петельных структур, связывающих отдельные активные области; определение направления переноса массы и энергии в зависимости от мощности и фазы развития активной области.

2. Весьма важными являются исследования дефицита магнитных потоков различной полярности в активных областях, принадлежащих одному комплексу.

Решение этих проблем требует значительного повышения чувствительности магнитографов при определении величины магнитного поля, пространственного разрешения в доли секунды, разрешения в оптическом диапазоне до $0,1''$, а в ультрафиолетовой и рентгеновской областях — до $1''$. Необходимо создание приборов для регистрации магнитных полей в переходной области и в короне по линиям в ультрафиолетовой и рентгеновской частях спектра.

II. Научные задачи по проблеме вспышечных явлений

Особое место в проявлениях активности Солнца принадлежит солнечным вспышкам. Во время вспышек хромосфера и корона над активной областью внезапно и сильно возбуждаются, при этом качественно изменяется излучение Солнца, в особенности в коротковолновой области спектра. Излучение солнечных вспышек происходит практически на всем диапазоне электромагнитного спектра от километровых радиоволн до жестких гамма-лучей. Оно регистрируется с помощью наземных, спутниковых и межпланетных обсерваторий. Одновременно осуществляются непосредственное детектирование ускоренных во время вспышки энергичных частиц, а также наблюдения вторичных ионосферных и геомагнитных возмущений. Таким образом, солнечные вспышки оказывают влияние на ряд важных сторон практической деятельности человека.

Солнечные вспышки при всей их необычности следует считать закономерной фазой развития активности Солнца. Поэтому необходимо изучение эволюции активных областей увязывать с исследованием именно тех особенностей развития этих областей, которые приводят к возникновению вспышек.

С наблюдательной и диагностической точек зрения солнечные вспышки наиболее полно описаны в книге Швестки /100/, в коллективной монографии под редакцией Старрока /101/ и в обзорной статье Раста /102/. Важнейшей особенностью вспышечного явления считается то обстоятельство, что преобладающая часть его энергии выделяется в нетепловых формах.

Вспышки сопровождаются появлением характерных петельных структур, которые привлекли особое внимание исследователей после получения наблюдательных данных в рентгеновском и ультрафиолетовом диапазонах спектра на орбитальной станции "Скайлэб". Обнаружены системы, состоящие из нескольких или даже многих петель, образующих своеобразные аркады, которые своими торцами опираются на две параллельные яркие "ленты" в хромосфере. Аркады образуют своеобразный магнитный "туннель", располагающийся над "нейтральной" линией магнитного поля активной области в фотосфере.

Наблюдения в жестком и мягком рентгеновском диапазонах с высоким временным разрешением показали, что освобождение энергии во вспышках носит характер последовательных коротких (3–10 с) импульсов /103/. Эти импульсы сопровождаются увеличением яркости в отдельных петлях вспышечной аркады. При этом последовательность возгорания петель оказывается перпендикулярной направлению магнитного поля, а возбуждающий агент переносится вдоль

аркады со скоростью 200–300 км/с /104/. Кроме этого, наблюдается монотонный подъем петель или, возможно, их последовательное возникновение на все больших высотах солнечной атмосферы. Иногда этот подъем происходит столь быстро, что приводит к появлению транзитов в короне и рождению или расширению корональных дыр /105/.

Вся совокупность имеющихся внеатмосферных наблюдательных данных позволяет сделать заключение о расположении первичного источника выделения энергии в вершинах аркад петель, и поэтому вспышка должна относиться к корональному, а не хромосферному явлению. Это также следует из относительно большой (до 90%) роли рентгеновского и ультрафиолетового излучений. Оптическое излучение вспышки возникает скорее всего как вторичный эффект вдали от сердцевины вспышки, точнее, в основаниях рентгеновских и ультрафиолетовых петель, уходящих торцами в хромосферу.

В первом приближении процессы накопления, "хранения" и освобождения энергии во вспышке можно представить условно в виде следующей схемы (рис. I). Эта схема удобна тем, что она позволяет довольно естественным образом разделить задачи исследования чрезвычайно сложного и разветвленного вспышечного явления на две части. Первая часть относится к изучению первичных физических процессов, ответственных за накопление и хранение энергии с последующим быстрым ее освобождением. Вторая часть – исследование физических процессов в атмосфере Солнца, которые возникают в результате взрывного освобождения накопленной энергии в форме потоков тепла, ускоренных частиц высоких энергий, излучения, магнитогидродинамических течений и волновых процессов в солнечной плазме. Эти вторичные процессы играют особенно важную роль, поскольку их теоретическое изучение и накопление наблюдательного материала позволяют определить, насколько правильны наши представления о вспышечном явлении.

Заметим, что приведенная схема является заведомо неполной. Так, например, сейчас еще нельзя указать точно, где осуществляется вторая стадия ускорения частиц до релятивистских энергий – на фронтах ударных волн /106/, как это показано на схеме, или эта фаза ускорения происходит в первичном источнике выделения энергии.

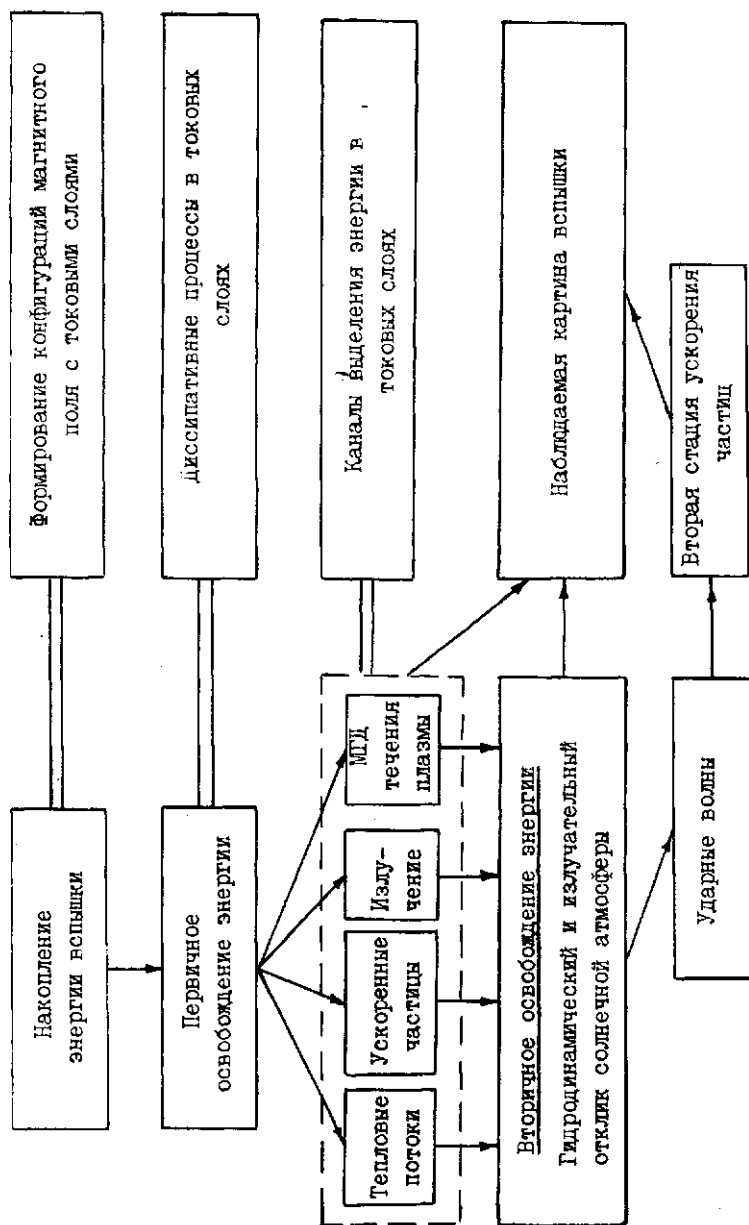
Накопленный в течение десятилетий наблюдательный материал позволил установить основные закономерности развития вспышечного процесса в хромосфере и, что особенно важно для понимания механизма вспышки, его тесную связь с магнитными полями в фотосфере Солнца. Более того, в верхней хромосфере и нижней короне, где возникает вспышка, наблюдения не дают указаний на существование какого-либо иного источника энергии, способного обеспечить энергетику вспышки, за исключением энергии магнитных полей. Поэтому наиболее обоснованным является представление о том, что источником энергии вспышек служит магнитное поле.

Обычно приводятся два основных возражения против гипотезы накопления энергии вспышки в виде магнитных полей.

1. Измерения магнитного поля на уровне фотосферы не указывают на однозначную связь вспышек с изменением магнитного поля или его выходом из подфотосферных слоев.

2. Характерное время диссипации магнитного поля в объеме, который мог бы обеспечить необходимую для вспышки энергию, слишком велико по сравнению с длительностью вспышки.

Современная теория вспышек дает на эти возражения достаточно полный ответ. Так, например, быстрая диссипация магнитного поля может быть объяснена



Р и с. 1. Иерархия физических процессов в солнечных вспышках

в рамках концепции пинчевых токовых слоев /I07-I09/. Согласно современным представлениям вспышечный процесс определяется наличием избыточной магнитной энергии по сравнению с энергией потенциального поля, т.е. связан с токами, текущими в солнечной атмосфере выше уровня фотосферы. Процессу вспышки соответствуют быстрые изменения этих токов. Естественно, что поток магнитного поля через фотосферу и, в частности, обычно измеряемая лучевая компонента магнитного поля могут при этом изменяться весьма незначительно. Теоретические оценки (см., например, /I09/), а также непосредственные наблюдения токов, текущих из фотосферы в корону /IЮ, III/, вполне согласуются с гипотезой о предвспышечном накоплении энергии в форме магнитных полей токов, протекающих в атмосфере Солнца. Тем не менее поиски решающих доказательств магнитной природы вспышек остаются одной из главных задач солнечной физики.

Для решения этой проблемы необходимо следующее.

1. Развивать технику высокоточных измерений полного вектора магнитного поля на нескольких уровнях атмосферы Солнца как в наземных обсерваториях, так и в космических лабораториях. Особенно важны измерения магнитных полей в короне по спектральным линиям в рентгене, ультрафиолете и по корональным линиям в оптическом диапазоне.

2. Продолжать исследования эволюции магнитных полей и изменений их структуры в предвспышечный период для групп пятен различных классов:

а) производить измерения и сравнительный анализ вектора магнитного поля в активных областях, генерирующих вспышки, и в спокойных АО;

б) обнаруживать выход новых потоков магнитного поля и устанавливать их связь со вспышками;

в) измерять градиенты магнитных полей вблизи нейтральной линии и лучевые скорости по этой линии с целью определения движения магнитных полей;

г) исследовать эволюцию поперечных полей, образование "бифуркаций", сдвигов магнитных полей; устанавливать связь скрученности полей с появлением вспышек;

д) из наблюдений на различных уровнях атмосферы Солнца рассчитывать системы токов в фотосфере, хромосфере и короне;

е) исследовать поля скоростей на различных уровнях атмосферы Солнца для установления процесса накопления массы газа в верхних слоях атмосферы;

ж) выяснить, какова роль концентрированных магнитных полей малых масштабов в процессе возникновения вспышки; возможно, что градиенты магнитного поля определяются степенью концентрации этих полей вблизи "нейтральной" линии.

3. Разработать методику расчета конфигураций магнитного поля в активной области, его волокнистой структуры в верхней атмосфере Солнца с учетом непотенциального характера поля в различных фазах развития вспышки.

4. Для научных и практических целей требуется вестеронне исследовать физические условия на всех уровнях солнечной атмосферы для выявления количественных признаков предвспышечного состояния. В частности, весьма перспективной задачей является отработка методики оценок характеристик магнитных полей на уровне хромосферы по H_α -фильтрограммам и установление на этой основе типичных изменений поля в связи со вспышками.

При выполнении условий, необходимых для возникновения вспышки, происходит первичное освобождение энергии. Внезапное (взрывообразное) начало солнечной вспышки предполагает наличие соответствующего триггерного механизма, заставляющего освободиться свободную энергию магнитных полей, на-

накопленную в магнитной конфигурации активной области. В моделях с диссипацией энергии магнитных полей имеется два токовых механизма, первый из которых связан с протеканием тока поперек магнитного поля (токовый слой), а второй — с неустойчивостью тока, текущего вдоль поля (модель токонесущей магнитной арки /II2/). В обоих случаях триггерный механизм срабатывает при превышении током определенного критического значения, в результате чего включается плазменная неустойчивость и резко увеличивается энерговыделение. Рост величины тока, в свою очередь, может быть связан с развитием МД-неустойчивости в магнитной конфигурации.

В механизмах первичного энерговыделения особенно важную роль играют коллективные плазменные процессы, определяющиеся турбулентным состоянием плазмы /II3-II5/. Наиболее существенными в физике солнечных вспышек оказались ионно-звуковая и ленгмювская моды плазменной турбулентности. Теоретическое изучение плазменных механизмов показало, что эти процессы в первичной стадии вспышки разыгрываются на чрезвычайно малых (по отношению к существующим возможностям наблюдательной техники) пространственных и временных масштабах. Это обстоятельство и необходимость проверки теоретических представлений о механизмах вспышечного энерговыделения привели к широкому разворачиванию работ по численному эксперименту /II6, II7/ и в особенности лабораторному моделированию на специальных плазменных установках.

Теоретические исследования токового слоя как предполагаемого источника энергии вспышки показали, что токовый слой может быть подвержен действию ряда неустойчивостей (например, тепловой из-за потерь энергии на излучение, перегретой — ввиду зависимости кулоновской проводимости от температуры, токовым неустойчивостям типа ионного звука, разрывной или тиринг-неустойчивости), в результате чего наступает выделение связанной со слоем магнитной энергии, т.е. развивается вспышка.

Пока остаются не вполне ясными вопросы, связанные с относительной ролью этих неустойчивостей и с условиями их развития, которые существенно зависят от внутренней структуры токового слоя и плазменных параметров. Ответы на эти вопросы могут быть получены путем моделирования токовых слоев на лабораторных установках с целью изучения динамики их образования и развития.

В настоящее время теория предлагает два основных механизма освобождения накопленной энергии магнитного поля в токовых слоях. Первый из них связан с возбуждением в слое какой-либо пороговой плазменной неустойчивости, приводящей к быстрому увеличению сопротивления плазмы в слое вследствие его турбулизации. При достаточно большой индуктивности токовых систем увеличение сопротивления приводит (при сохранении средних величин магнитных полей) к резкому росту скорости энерговыделения. При этом резко возрастает величина напряженности электрического поля вдоль слоя и, следовательно, создаются условия для эффективного ускорения частиц плазмы до больших энергий.

Второй механизм освобождения энергии связан с разрывом слоя (предполагается, что здесь также возможен переход к аномальному сопротивлению), т.е. с быстрым изменением конфигурации магнитного поля. К настоящему времени экспериментально доказано, что такой макроскопический разрыв слоя возможен /II8/. Однако механизм разрыва слоя и условия, при которых он осуществляется, изучены недостаточно. Результаты эти весьма важны, поскольку получен ряд экспериментальных указаний /II8/, что разрыв возможен при условии, когда концентрация плазмы около слоя мала, что может быть использовано для диагностики токовых слоев на Солнце.

Эффективность первого механизма, связанного с включением пороговой неустойчивости, ярко проиллюстрирована в экспериментах Баума и Братенала /119/, в которых причиной резкого увеличения сопротивления плазмы является ионно-звуковая турбулентность. По условиям экспериментальной установки результаты этих экспериментов /119/ нельзя использовать для изучения процесса всплечного энерговыделения. Исследования этого процесса для нейтральных токовых слоев были выполнены в лабораторных экспериментах на установке "УН-Феникс" в СибИЗМИР /120,121/.

Основным результатом лабораторных экспериментов /120,121/ можно считать доказательство высокой эффективности процессов нагрева и ускорения частиц плазмы, вполне достаточной при разумных предположениях для объяснения наблюдаемого при солнечных вспышках энерговыделения. Важным обстоятельством является разнообразие форм, в которые преобразуется энергия магнитного поля при диссипации тока в слое благодаря аномальному сопротивлению. Коллективные взаимодействия частиц плазмы приводят не только к ее быстрому нагреву, но и к появлению потоков высокоэнергичных частиц, жесткого рентгеновского и радиоизлучений, характерных для солнечных вспышек.

В лабораторных экспериментах необходимо продолжить:

- а) исследование возможностей накопления энергии магнитного поля в окрестности токового слоя;
- б) изучение устойчивости токового слоя и причин быстрой конверсии энергии магнитного поля в окрестности слоя в кинетическую энергию частиц плазмы и в излучение.

Острым и до сих пор не вполне решенным вопросом является соотношение двух главных каналов выделения энергии в области магнитного пересоединения — ускорения частиц /122/ и нагрева плазмы /123/. Неясно какова относительная роль этих процессов во время первичного освобождения энергии. Современное состояние проблемы изложено Смитом и Лиллеквистом /124/ и Сомовым /125/. Только наблюдения и эксперимент в лабораторных условиях могут дать ответ, какой процесс (тепловой или нетепловой) реализуется во вспышке в первую очередь, и выявить их относительную роль в энерговыделении.

Для решения проблемы первичного освобождения энергии необходимо получение следующих наблюдательных данных.

1. Определение локализации и формы источника всплечного излучения с высоким пространственным разрешением ($\sim 1''$) в жестком, мягком рентгеновских диапазонах и ультрафиолетовых лучах, а также его расположения относительно хромосферных и фотосферных структур.

2. Измерение анизотропии и поляризации жесткого рентгеновского излучения вспышек /126,127/.

3. Исследование эффектов нестационарной ионизации, асимметрии линий и других особенностей в рентгеновских, ультрафиолетовых и оптических спектрах солнечных вспышек /128,129/.

4. Существенную информацию об области первичного освобождения энергии можно получить из наблюдений в микроволновом диапазоне с высоким пространственным разрешением /130/ и данных по флуктуациям радиоизлучения /131,132/.

Для понимания всплечного процесса весьма важным является изучение механизма вторичного освобождения энергии — гидродинамического и излучательного откликов солнечной атмосферы /133-137/.

Для динамики высокотемпературной области вспышки существенным является превышение электронной температуры над ионной. На стадии импульсного нагрева хромосферы энергичными электронами до начала формирования ударной волны

возникает тепловая неустойчивость /I37-I38/. Прежде чем нагретая плазма успеет расшириться, более быстрый процесс лучистого охлаждения и ее сжатия может привести к образованию холодных и плотных конденсаций. С ростом массы конденсации и уменьшения ее температуры она может стать источником непрерывного излучения в оптическом диапазоне (белая вспышка /I39/).

Значительная часть рентгеновского и ультрафиолетового излучения солнечной вспышки поглощается в хромосфере непосредственно под высокотемпературной областью и в ближайшей окрестности. Рентгеновские кванты и излучение в области лаймановского континуума с длинами волн $\lambda \leq 912\text{\AA}$ поглощаются в верхней хромосфере, а кванты излучения в области спектра с $\lambda > 912\text{\AA}$ проникают в более глубокие слои солнечной атмосферы и поглощаются главным образом в слое вблизи температурного минимума /I39, I40/.

Результат воздействия рентгеновского излучения на хромосферу подтвержден недавними наблюдениями на спутнике "Solar Maximum Mission" /I41, I42/. Эффекты воздействия ультрафиолетового излучения вспышки на хромосферу и фотосферу изучены в настоящее время менее полно.

Значительная часть полной энергии вспышки выделяется в виде движений плазмы в хромосфере и короне. Вспышечные движения порождают сильные ударные волны, энергия которых в межпланетном пространстве сопоставима с полной энергией вспышки. Быстрые движения солнечной плазмы, вспышечные выбросы, спреи и в особенности корональные транзиенты, по-видимому, могут производить быструю перестройку магнитного поля в верхних слоях атмосферы Солнца. Получены наблюдательные доказательства существования прямой связи между транзиентами и появлением открытых структур магнитного поля /I43, I44/.

Для выяснения физической природы процессов, возникающих в солнечной атмосфере в результате вторичного освобождения вспышечной энергии, необходимо следующее.

1. Оптические наблюдения в линиях и непрерывном спектре с высоким временным (~ 1 с) и пространственным ($< 1''$) разрешением.

2. Наблюдения в рентгеновском и ультрафиолетовом диапазонах с хорошим временным и пространственным разрешением, исследование спектров вспышек в этих областях.

3. Исследование влияния излучения с длинами волн $\lambda < 912\text{\AA}$ на структуру вспышечного переходного слоя, образование "вторичных" переходных слоев и "испарение" хромосферы.

4. Исследование влияния излучения с длинами волн $\lambda > 912\text{\AA}$ на область температурного минимума.

5. Исследование теоретически и в лабораторных условиях механизма ускорения частиц до высоких энергий ленточковой турбулентностью.

6. Исследование турбулентного эффекта Штарка и его проявлений в условиях вспышечной плазмы /I45/.

7. Магнитографические наблюдения с возможно большим пространственным и временным разрешением, исследование поля скоростей в области вспышки и характера движений в ее узлах на различных фазах развития.

8. Важны наблюдательные доказательства волновых движений, распространения фронтов ударных волн и выяснение их влияния на возникновение вспышек в других активных областях.

9. Исследования поведения концентрированных магнитных полей малых масштабов в различных фазах развития вспышек.

Особо следует подчеркнуть, что проблема исследования такого сложного и относительно кратковременного явления, как солнечная вспышка, требует компи-

лексного изучения отдельных событий в возможно более широком спектральном диапазоне (оптика, радио, рентген и т.д.), с привлечением синхронных спутниковых наблюдений. Полученный наблюдательный материал должен анализироваться с учетом самых последних результатов современной физики плазмы как теоретических, так и экспериментальных. С этой точки зрения большое значение в исследованиях активных областей и вообще имеет проведенная недавно международная программа "Год солнечного максимума".

Л и т е р а т у р а

1. M.V.Zombeck, G.S.Vaiana, R.Haggarsty, A.S.Krieger, J.K.Silk, A.Timothy. *Astrophys. J., Suppl.*, 1978, v.38, 69.
2. R.S.Chase, A.S.Krieger, Z.Svestka. *COSPAR Space Res.*, 1976, v.16, 917.
3. A.B.Severny. *Scientia*, 1966, v.101, No 9-10, 395.
4. И.И.Александрович, В.Е.Степанов. Сб. "Исследования по геомагнетизму, аэронавигации и физике Солнца". М., "Наука", 1971, вып.2, 15.
5. Дж.И.Иргашев. Солнечные данные, 1977, № 3, 92.
6. B.L.Lippincott, C.R.Acad. Sci., 1955, v.240, No 6, 593.
7. О.К.Кипенхойер. Солнце. М., ИЛ, 1957, 331.
8. Н.В.Степенко. Изв.Крымской астрофиз.обсерв., 1965, т.37, 21.
9. G.V.Simon, J.B.Zirker. *Solar Phys.*, 1974, v.35, 331.
10. J.M.Beckers, E.H.Schröter. *Solar Phys.*, 1968, v.4, 142.
11. J.O.Stenflo. *Solar Phys.*, 1973, v.32, 41.
12. J.W.Harvey, D.Hull. Abstract of Report at the 14-th AAS Meeting, San Diego, 1975.
13. J.P.Mehlretter. *Solar Phys.*, 1974, v.38, 43.
14. D.Vrabc. *Space Phys.Labor.*, 1973, No.SPL-74 (8102)-5.
15. А.Б.Северный. Изв.Крымской астрофиз.обсерв., 1965, т.33, 34.
16. А.Б.Северный. *Астрон.ж.*, 1959, т.36, 208.
17. V.Bumba. *Solar Phys.*, 1967, v.1, 371.
18. J.O.Stenflo. Basic Mechanisms of Solar Activity, 1976, Symp. No 71.
19. R.G.Athay. The Solar Chromosphere and Corona: Quiet Sun, 1976, 152.
20. R.E.Loughhead, R.J.Bray. *Austral.J.Phys.*, 1961, v.14, 347.
21. P.S.McIntosh. *IAU Symp.*, 1968, No.35, 157.
22. J.Rösch. *IAU Symp.*, 1968, No.35, 167.
23. R.Bray, R.Loughhead. *Sunspots*, London, 1964, 334.
24. М.К.В.Варпу, В.М.Григорьев, В.Е.Степанов. *Solar Phys.*, 1968, v.4, 409.
25. V.Bumba, R.Howard. *Astrophys.J.*, 1965, v.141, 1492.
26. В.М.Григорьев, Л.В.Ермакова. Сб. "Возникновение и эволюция активных областей на Солнце". Тр.УИ Консульт.совещания АН соц.стран по физике Солнца. М., "Наука", 1976, 54.
27. С.И.Гопаски. Изв.Крымской астрофиз.обсерв., 1967, т.37, 29.
28. I.Kowaguchi, R.Kitai. *Solar Phys.*, 1976, v.46, 125.
29. С.А.Каплан, С.Б.Пикельнер, В.И.Цытович. Физика плазмы солнечной атмосферы. М., "Наука", 1977, 72.
30. K.L.Harvey, S.F.Martin. *Solar Phys.*, 1973, v.32, 389.
31. E.Born. *Solar Phys.*, 1974, v.38, 127.
32. С.И.Гопаски. Изв.Крымской астрофиз.обсерв., 1967, т.36, 56.
33. S.F.Martin, K.L.Harvey. *LMSC Report D269923*, 1972.
34. A.Bruzek. *Solar Phys.*, 1967, v.2, 451.
35. A.Bruzek. *Solar Phys.*, 1969, v.8, 29.
36. S.R.Weart. *Astrophys.J.*, 1970, v.162, 987.

37. E.N.Frazier. *Solar Phys.*, 1972, v.26, 130.
38. V.Bumba, R.Howard, M.J.Martres. *IAU Symp.*, 1968, No.35, 13.
39. S.R.Weart, H.Zirin. *Publ.Astron.Soc.Pacif.*, 1969, v.81, 270.
40. H.Zirin, R.Tanaka. *Solar Phys.*, 1973, v.32, 172.
41. D.L.Glackin. *Solar Phys.*, 1975, v.43, 317.
42. С.И.Попасюк. -Изв.Крымской астрофиз.обсерв., 1973, т.47.
43. Т.Т.Уан. -Изв.Крымской астрофиз.обсерв., 1978, т.58, 13.
44. R.Howard. *Solar Phys.*, 1971, v.16, 21.
45. Н.Н.Степанян, Э.А.Щербакова. -Изв.Крымской астрофиз.обсерв., 1975, т.53, II6.
46. C.J.Wolfson, L.W.Aston, J.W.Leibacher, S.T.Roethig. *Solar Phys.*, 1977, v.55, 181.
47. J.A.Vorpahl. *Bull.Amer.Astron.Soc.*, 1975, v.7.
48. J.M.Mosher. *Solar Phys.*, 1979, v.64, 109.
49. N.R.Sheeley, Jr.*Solar Phys.*, 1980, v.66, 79.
50. R.Howard, L.Fritsova-Svestkova, Z.Svestka. *Solar Phys.*, 1979, v.63, 105.
51. Л.Г.Карташева. Изв.Крымской астрофиз.обсерв., 1976, т.56, 84.
52. E.R.Priest. *Solar Phys.*, 1978, v.58, 57.
53. R.Rosner, W.H.Tucker, G.S.Vaiana. *Astrophys.J.*, 1978, v.220, 643.
54. J.D.Craig, A.N.McClymont, J.H.Underwood. *Astron.and Astrophys.*, 1978, v.70, 1.
55. A.W.Hood, E.R.Priest. *Astron.and Astrophys.*, 1979, v.77, 233.
56. M.Landini, B.C.Monsignori-Fossi. *Astron.and Astrophys.*, 1975, v.42, 213.
57. P.J.Cargill, E.R.Priest. *Solar Phys.*, 1980, v.65, 251.
58. W.H.Glencross. *Astron.and Astrophys.*, 1980, v.83, 65.
59. P.Foukal. *Solar Phys.*, 1975, v.43, 327.
60. P.Foukal. *Astrophys.J.*, 1976, v.210, 575.
61. Chung-Chieh Cheng. *Solar Phys.*, 1980, v.65, 347.
62. G.S.Vaiana, J.M.Davis, R.Giacconi, A.S.Krieger, J.K.Silk, A.F.Timothy, M.Zombeck. *Astrophys.J.*, 1973, v.185, L47.
63. R.Tousey, J.-D.F.Bartoc, G.E.Brueckner, J.D.Purcell, V.E.Scherer, N.Sheeley, R.J.Schumacher, M.E.Van Hoosier. *Solar Phys.*, 1973, v.33, 265.
64. A.S.Krieger. *Proc.OSO-8 Workshop*, Boulder, 1977.
65. Ю.И.Витинский. *Солнечные данные*, 1969, № 8, 100.
66. R.M.McQueen, J.A.Eddy, R.H.Hildner, G.A.Hanson, G.A.Duen. *Solar Phys.*, 1974, v.187, L85.
67. R.I.Stewart, R.M.McQueen, M.J.Kosmen, R.T.Hansen, G.A.Duen. *Solar Phys.*, 1974, v.36, 303.
68. Y.T.Gosling, R.H.Hildner, R.M.McQueen, R.H.Munro, A.I.Poland, C.L.Ross. *J.Geophys.Res.*, 1974, v.79, 4581.
69. M.J.Kosmen, R.F.Howard, R.J.Hansen, S.F.Hansen. *Solar Phys.*, 1974, v.34, 447.
70. G.A.Dulk, S.F.Smerd, R.M.McQueen, Y.T.Gosling, A.Masen, R.T.Stewart, R.V.Sheridan, R.D.Robinson, S.J.Jacknes. *Solar Phys.*, 1976, v.49, 369.
71. I.E.Gergely, M.R.Kundu, R.N.Munro, R.I.Poland. *Astrophys.J.*, 1979, v.230, 575.
72. Y.T.Gosling, E.Hildner, R.M.McQueen, R.H.Munro, A.I.Poland, S.L.Ross. - *Solar Phys.*, 1976, v.48, 389.
73. R.Saito, A.I.Poland, R.H.Munro. *Solar Phys.*, 1977, v.55, 121.
74. V.B.Jackson, E.Hildner. - *Solar Phys.*, 1978, v.60, 155.
75. E.Tandberg-Hanssen. *Solar Prominences*, D.Reidel Publ.Co., Boston, USA, 1974.

76. А.М.Зверева, А.Б.Северный. Изв.Крымской астрофиз.обсерв., 1965, т.41-42, 97.
77. В.А.Котов. Изв.Крымской астрофиз.обсерв., 1974, т.51, 39.
78. В.А.Котов. Изв.Крымской астрофиз.обсерв., 1976, т.54, 184.
79. С.И.Гопасюк. Изв.Крымской астрофиз.обсерв., 1965, т.33, 100.
80. С.И.Гопасюк. Изв.Крымской астрофиз.обсерв., 1966, т.35, 139.
81. G.Aletti. The Sun, London, Faber and Faber, 1962, 157.
82. P.Maltby. Astrophys.Norveg., 1964, v.8, No 8, 205.
83. Г.В.Куклин, В.Е.Степанов. Солнечные данные, 1963, № 1, № 2.
84. С.И.Гопасюк. Изв.Крымской астрофиз.обсерв., 1977, т.57, 107.
85. N.R.Sheeley. Solar Phys., 1969, v.9, 347.
86. K.Harvey, J.Harvey. Solar Phys., 1973, v.28, 61.
87. A.B.Severny, J.M.Wilcox, P.H.Scherrer, D.S.Golbun. Solar Phys., 1970, v.15, 3.
88. С.И.Гопасюк. Автореферат докторской диссертации. Л., 1973.
89. R.B.Leighton. Astrophys.J., 1964, v.140, 1547.
90. V.Bumba, R.Howard. Astrophys.J., 1965, v.141, 1502.
91. R.B.Leighton. Astrophys.J., 1969, v.156, 1.
92. J.O.Stenflo. Solar Phys., 1974, v.36, 495.
93. N.R.Sheeley. Solar Phys., 1969, v.9, 347.
94. В.Е.Степанов. Изв.Крымской астрофиз.обсерв., 1960, т.23, 184.
95. В.Е.Степанов. Изв.Крымской астрофиз.обсерв., 1961, т.25, 154.
96. S.Meger. Comp.Rend.Academie Sci., 1960, v.251, No 14, 1346.
97. R.G.Giovanelli, J.V.Ramsey. Solar Magnetic Fields. IAU Symp., 1971, v.43, 293.
98. R.A.Servajean. Astrophys.J., 1961, v.124, 1.
99. G.W.Simon, R.B.Leighton. Astrophys.J., 1964, v.140, 1120.
100. Z.Svestka. Solar Flares 1976, Dordrecht-Holland, 33.
101. P.A.Sturrock ed al. The Proc. of the Skylab Workshop on Solar Flares, NASA, 1979.
102. D.M.Rust. Solar Flares, accepted for publ. In: Solar System Plasma Physics (Preprint ASE-4218), 1979.
103. H.F.Van Beek, L.D.de Feiter, C.de Jager. Space Res., 1976, v.16, 819.
104. J.A.Vorpahl. Astrophys.J., 1976, v.205, 862.
105. S.I.Syrovatskii, B.V.Somov. In: Solar and Interplanetary Dynamics. Proc.IAU Symp.No 91, D.Reidel Publ.Co., Dordrecht, 1980.
106. V.M.Gubchenko, V.V.Zaitsev. Solar Phys., 1979, v.63, 337.
107. J.Heuvaerts, E.R.Priest, D.M.Rust. Astrophys.J., 1977, v.216, 123.
108. Сб. "Вспышечные процессы в плазме". Тр.ФИАН СССР, 1979, т.110.
109. С.И.Сыроватский. Изв.АН СССР, сер.физ., 1979, т.43, 695.
110. А.М.Зверева, А.Б.Северный. Изв.Крымской астрофиз.обсерв., 1970, т.41, 97.
111. K.Tanaka. Solar Phys., 1978, v.58, 149.
112. D.S.Spicer. Solar Phys., 1977, v.53, 249.
113. В.М.Томозов. Астрон.ж., 1971, т.48, 556.
114. В.М.Томозов. Астрон.ж., 1972, т.49, 802.
115. J.Heuvaerts, M.Kuperus. Astron and Astrophys., 1978, v.68, 145.
116. К.В.Брушинский, А.М.Зоборов, С.И.Сыроватский. Препринт ИГиМ АН СССР.М., 1978, № 86.
117. А.И.Подгорный, С.И.Сыроватский. Сб. "Вспышечные процессы в плазме". Тр.ФИАН СССР, 1979, т.110, 33.

- II8. Н.П.Кирий, В.С.Марков, С.И.Сироватский, А.Т.Франк, А.З.Ходжаев.
Сб."Вспышечные процессы в плазме". Тр.ФИАН СССР, 1979, т.110, 121.
- II9. P.J.Baum, A.Bratenahl. Solar Phys., 1976, v.47, 331.
- I20. A.T.Altynsev, V.I.Krasov, V.M.Tomozov. Solar Phys., 1977, v.55, 69.
- I21. А.Т.Алтынцев, В.И.Красов. Препринт СибИЗМИР № 4-79. Иркутск, 1979.
- I22. L.E.Peterson, J.R.Winckler. J.Geophys.Res., 1966, v.64, 697.
- I23. T.A.Chubb, J.R.Kreplin, H.F.Friedman. J.Geophys.Res., 1966, v.71, 3611.
- I24. D.F.Smith, C.G.Lilliequist. Astrophys.J., 1979, v.232, 582.
- I25. Б.В.Сомов. Изв.АН СССР, сер.физ., 1979, т.43, 708.
- I26. Б.В.Сомов, И.П.Тиндо. Космические исследования, 1978, т.16, 686.
- I27. М.А.Лившиц, В.М.Томозов. Астрон.ж., 1974, т.51, 560.
- I28. Sixth International Colloquium on Ultraviolet and X-ray Spectroscopy
of Astrophys. and Laboratory Plasmas, IAU Coll. Toronto, No 55,
1980.
- I29. V.V.Korneev, V.V.Krutov, S.L.Mandelstam, A.M.Urnov, I.A.Zhitnik,
A.Ja.Kononov, B.Sylwester, J.Sylwester. Solar Phys., 1979,
v.63, 319.
- I30. K.A.Marsh, G.J.Hurford. Preprint BBSO 0191 California Inst. of
Technology, 1980.
- I31. N.S.Kaverin, M.M.Kobrin, A.I.Korshunov, V.V.Shushunov. Solar Phys.,
1979, v.63, 379.
- I32. V.Gaizauskas, K.F.Tapping. Preprint of Herzberg Inst.of Astrophys.,
National Research Council Canada, 1980.
- I33. C.L.Hyder. Solar Phys., 1967, v.2, 49 and 267.
- I34. H.W.Bloomberg, J.Davis, J.P.Boris, J.Quant. Spectrosc. and Radiative
Transfer, 1977, v.18, 237.
- I35. T.Hirayama. Res.Rept.Inst.Plasma Phys., Nagoya Univ., 1979,
No. 365, 22.
- I36. Fukaе Nagai, Ph.D.Thesis, Univ.of Tokyo, 1979.
- I37. Б.В.Сомов, С.И.Сироватский. Успехи физ.наук, 1976, т.120, 217.
- I38. G.B.Field. Astrophys.J., 1965, v.142, 531.
- I39. А.Г.Косовичев, М.А.Лившиц, А.Г.Бадалян. Астрон.циркуляр, 1979, №1069.
- I40. B.V.Somov. Solar Phys., 1975, v.42, 235.
- I41. C.G.Rapley. Sixth International Colloquium on Ultraviolet and X-ray
Spectroscopy of Astrophys. and Laboratory Plasmas, IAU Coll. Toronto,
1980, No 55.
- I42. J.W.Leibacher. Sixth International Colloquium on Ultraviolet and
X-ray Spectroscopy of Astrophys. and Laboratory Plasmas, IAU Coll.
Toronto, 1980, No 56.
- I43. D.M.Rust. Transient coronal holes and magnetic reconnection.
Preprint ASE-4318, 1978.
- I44. D.F.Webb, P.S.McIntosh, J.T.Nolte, C.V.Solodina. Solar Phys., 1978,
v.58, 389.
- I45. В.Г.Банин, В.П.Макоимов, В.М.Томозов. Сб."Исследования по геомагнетизму,
аэронауке и физике Солнца". М., "Наука", 1979, вып.45, 54.

Сибирский институт земного магнетизма,
ионосферы и распространения радиоволн СО АН СССР
Крымская астрофизическая обсерватория АН СССР
Физический институт имени П.Н.Лебедева АН СССР