

УДК 523.98

СТРУКТУРА И ДИНАМИКА МАГНИТНОГО ПОЛЯ В ФОТОСФЕРЕ СОЛНЦА
ПРИ ВОЗНИКНОВЕНИИ И В ПРОЦЕССЕ ЭВОЛЮЦИИ АКТИВНЫХ ОБЛАСТЕЙ

Л. В. Ермакова

STRUCTURE AND DYNAMICS OF THE MAGNETIC FIELD IN THE SUN'S
PHOTOSPHERE DURING THE BIRTH AND IN THE COURSE OF ACTIVE
REGION EVOLUTION

L. V. Ermakova

An analysis is made of known results from the study of structure and dynamics of the magnetic field in the active regions. A brief discussion of models for their production and decay is given.

При написании данной статьи преследовалась цель - провести анализ известных наблюдательных данных, способствующих установлению механизмов возникновения и разрушения активных областей и сопоставить с ними существующие модели этих процессов. Давно установлено, что возникновение активных областей связано с появлением в атмосфере Солнца локальных магнитных полей высокой напряженности. Следовательно, для понимания природы активных областей необходимо выяснить, каково происхождение этих магнитных полей, какие изменения претерпевают они в процессе эволюции, какие изменения в магнитных полях приводят к разрушению активных областей. На эти вопросы нельзя ответить без детального изучения структуры и динамики магнитного поля в активных областях. Наиболее пригодным для этой цели методом регистрации магнитного поля является магнитографический, поскольку он позволяет получить информацию о магнитном поле обширных участков поверхности Солнца с высокой точностью. Поэтому в данной статье анализируются главным образом данные магнитографических наблюдений.

Возникновение активных областей

Почти сорок лет назад Каулинг [1], изучая эволюционные изменения магнитного поля пятен в двух долгоживущих группах, пришел к выводу, что пятна образуются в результате выхода из подфотосферных слоев магнитного поля. В качестве механизма выхода Паркер [2] предложил магнитную плавучесть. Когда в процессе действия динамо напряженность тороидального магнитного поля достигает некоторого критического значения, магнитная плавучесть начинает преобладать над гравитацией и аэродинамическим сопротивлением и петля, образованная изгибом трубки тороидального магнитного поля, всплывает. По мере приближения к поверхности из-за уменьшения давления вещества трубка магнитного поля расширяется, приводя к уменьшению напряженности.

Таким образом, перед наблюдателями возникли следующие задачи. Прежде всего нужно было установить источник магнитных полей активных

областей. Если подтвердится, что магнитное поле активной области действительно выходит из-под фотосферы, то необходимо определить механизм его выхода. Наконец, если вышедшее магнитное поле имеет малую напряженность, то нужно определить механизм концентрации его до напряженностей, наблюдаемых в пятнах.

Первое подробное исследование возникновения активных областей было выполнено Бумбой и Говардом [3]. Они проследили появление большого числа активных областей по магнитограммам обсерватории Маунт-Вилсон и фильтрограммам, полученным в линиях K CaII и H α . Магнитограммы имели плохое временное (1 сут.) и пространственное (23") разрешение. Используемый материал позволил установить наиболее общие закономерности образования активных областей. Просмотр магнитограма показал, что магнитное поле новой активной области появляется в фотосфере за 2-3 дня до образования группы пятен. Новое магнитное поле не является результатом усиления старого. Авторы не склонялись безоговорочно в пользу подъема магнитного поля новых активных областей из-под фотосферы, а рассматривали это как одну из возможностей. Другая возможность, по их мнению, заключается в том, что процесс формирования отдельной активной области представляет собой часть крупномасштабной активности. Анализ фильтрограмм позволил обнаружить, что первое поярчение в хромосфере, связанное с образованием новой активной области, наблюдается в узлах хромосферной сетки, являющейся отражением конвективных ячеек - супергранул [4]. Первые пятна также образуются на стыках супергранул. На основании этого авторы сделали вывод о важной роли конвекции в формировании и развитии активных областей: движения вещества в супергранулах приводят к концентрации слабого магнитного поля, следствием чего является образование пятен.

Гопасж [5], анализируя карты продольного магнитного поля, имеющие лучшее, по сравнению с [3], временное и пространственное разрешение, на примере одной активной области показал, что картина изменений продольного магнитного поля на ранней стадии развития активной области согласуется с предположением о выходе трубки магнитного поля из-под фотосферы. Изучая закономерности расхождения главных пятен в группе, Витинский и Ихсанов [6] объяснили их тем, что трубка магнитного поля, образующая активную область, имеет форму полуокружности. Полученные вскоре результаты Баппу, Григорьева и Степанова [7] могут рассматриваться как прямое доказательство выхода магнитного поля из-под фотосферных слоев, поскольку проводилась регистрация полного вектора магнитного поля. Первые изменения в фоновом магнитном поле появились за три дня до возникновения пятен. Напряженность нового магнитного поля в это время составляла порядка десяти гаусс. В первый день существования группы пятен магнитное поле было сильно прижато к поверхности, а в последующие дни угол между

направлением поля и нормалью к поверхности уменьшался, что можно объяснить подъемом трубки магнитного поля. Авторы [7] также подтвердили результаты Бумбы и Говарда относительно места локализации первых проявлений активности в хромосфере.

Таким образом, ранние исследования возникновения активных областей, выполненные на материале с низким временным и пространственным разрешением, говорят в пользу того, что активные области образуются в результате выхода из-под фотосферы трубки магнитного поля. Поскольку первые изменения в фотосферном магнитном поле, вызванные образованием новой активной области, появляются за два-три дня до возникновения группы пятен, сложилось мнение, что магнитный поток, необходимый для образования группы пятен, собирается на поверхности в течение этого времени. А наличие соответствия между распределением магнитного поля на стадии формирования активной области и картиной супергранул объяснили тем, что вынос магнитного поля на поверхность и концентрация его осуществляются посредством конвективных движений.

Примером модели, в которой основная роль в выносе и концентрации магнитного поля принадлежит конвекции, может служить модель Пономаренко [8]. Согласно этой модели активная область образуется из слабого тороидального магнитного поля, расположенного в основании конвективной зоны. Поскольку энергия магнитного поля мала по сравнению с энергией движущегося вещества, поле захватывается поднимающимся в гигантских гранулах веществом и выносится на поверхность. Концентрация магнитного поля осуществляется супергранулами. В данной модели магнитное поле ведет себя пассивно по отношению к конвективным движениям.

Следующий этап в изучении возникновения активных областей связан с достижением более высокого временного и пространственного разрешения. В начале семидесятых годов сложились представления о волоконной структуре магнитных полей на Солнце. Косвенным методом было получено, что более 90% всего магнитного потока содержится в волокнах, имеющих высокую напряженность и малый поперечный размер [9, 10]. В каком виде магнитное поле появляется на поверхности, неизвестно, но можно допустить, что поднимающееся магнитное поле уже сконцентрировано в волокна. Поскольку пространственное разрешение при магнитографических наблюдениях недостаточно для того, чтобы регистрировать отдельные магнитные волокна, то измеряемые напряженности магнитного поля будут значительно ниже истинных. Вынос такого магнитного поля на поверхность и концентрацию его до образования пятен в соответствии с прежними представлениями попытались связать с супергранулами. Так, например, Фрейзер [11] наблюдал раздвижение малых холмов продольного магнитного поля противоположной полярности от центра системы арочных волокон (хромосферного образования, связываемого с выхо-

дом нового магнитного поля [12]) к ее краям. Предполагая, что наблюдаемые малые холмы продольного магнитного поля представляют собой сечения поверхностью фотосферы петли, образованной магнитным волокном, а также, учитывая наблюдаемые скорости движения их, не превышающие скорости движения вещества в супергранулах, Фрейзьер сделал вывод о том, что супергранулы выносят отдельные магнитные волокна на поверхность и концентрируют их на своих границах. Однако Фрейзьер не мог определить из наблюдений положение системы арочных волокон относительно супергранулы. Кроме того, его наблюдения относились к развитой активной области, когда уже не было массового выхода нового магнитного потока. Шульман [13] наблюдал раздвижение биполярных пар малых холмов магнитного поля в активной области со скоростями, значительно превышающими скорости движения вещества в супергранулах, а Глэкин [14] и Борн [15] установили, что системы арочных волокон появляются не в центрах ячеек хромосферной сетки, а вблизи их границ. Эти результаты говорят против модели Фрейзьера. Борн пришел к выводу, что появление систем арочных волокон связано с появлением новой ячейки хромосферной сетки, а следовательно, образование активной области связано возникновением новой конвективной ячейки, которая появляется на стыках старых. С этим согласуется то обстоятельство, что согласно [16] центры новых конвективных ячеек преимущественно располагаются на стыках старых. По приведенным результатам можно сделать вывод, что конвективный подъем вещества способствует выходу на поверхность магнитного поля. В то же время остается неясным, почему не происходит выход магнитного поля внутри старых супергранул.

Борн получил также и другой интересный результат, а именно: время между появлением первого арочного волокна и образованием первой поры составляет всего около трех часов. Это значит, что магнитный поток, необходимый для образования поры, собирается на поверхности в течение нескольких часов, а не десятков часов, как следовало из наблюдений с низким временным и пространственным разрешением. Этот результат, полученный косвенным методом, подтверждается в работе Григорьева, Ермаковой [17], изучавших непосредственно динамику продольного магнитного поля при возникновении активной области. Использовались магнитограммы панорамного магнитографа, имеющие пространственное разрешение $2'' \times 4''$; время получения одной магнитограммы составляет 5 мин. Авторами [17] было показано, что хотя первые изменения в фотосферном магнитном поле появляются за несколько десятков часов до образования группы пятен, появление большей части магнитного потока, необходимого для образования первых пор, происходит в течение нескольких часов. Следовательно, нет предварительного накопления магнитного потока в фотосфере, появление магнитного поля новой активной области и ее формирование происходят одновременно. Увеличе-

ние магнитного потока продолжается с высокой скоростью до тех пор, пока не образуются развитые пятна с полутенями [18], после чего скорость увеличения магнитного потока заметно уменьшается.

Врабец [19] обнаружил движение малых холмов магнитного поля по направлению к пятну соответствующей полярности и последующее слияние с ним, что является основным проявлением процесса концентрации магнитного поля. Поскольку в некоторых случаях движения происходили вдоль постоянных направлений, Врабец счел невозможным объяснить их действием конвекции и отнес за счет строения трубки магнитного поля, образующей активную область: трубка в своей верхней части расщеплена и подъем ее приводит к наблюдаемому "втеканию" малых холмов магнитного поля в пятно. Ермакова и Котрч [20] наблюдали концентрацию магнитного поля в молодой активной области. Этот процесс характеризовался нерегулярностью во времени: в течение первых суток наблюдений происходил рост площадей холмов продольного магнитного поля, а взаимное расположение их не менялось; тогда как в течение последующих суток произошло объединение различных холмов магнитного поля. Если учесть, что перемешанные между собой холмы магнитного поля противоположных полярностей в процессе концентрации безошибочно находили "свою" полярность, то напрашивается вывод о наличии подфотосферной связи между холмами магнитного поля одной полярности. Вертикальный размер такой магнитной конструкции $\geq v \cdot 2$ сут. (v - скорость подъема магнитного поля).

Приведенные данные говорят в пользу того, что активная область образуется в результате подъема трубки магнитного поля. Возможно, подъему трубки способствует конвекция, однако наблюдаемый в фотосфере процесс концентрации магнитного поля, по-видимому, является следствием строения и динамики самой трубки. Пятна становятся видимыми тогда, когда на поверхность выйдут части трубки, имеющие необходимое распределение магнитного поля.

В последние годы Бумба с сотрудниками [21-26] в серии статей подверг критике концепцию образования активных областей в результате выхода магнитного поля из-под фотосферы. Используя обширный наблюдательный материал (главным образом магнитограммы продольного магнитного поля и фотогелиограммы), они рассмотрели закономерности возникновения и развития активных областей по отношению к фоновым магнитным полям и полагают невозможным объяснить их выходом магнитного поля из-под фотосферы. Делается вывод о том, что развитие активной области является частью развития фоновое магнитное поле, и магнитное поле активной области генерируется непосредственно в фотосфере. В исследованиях [21-26] применяется три пространственных разрешения: низкое, умеренное и высокое. Магнитограммы с низким пространственным разрешением используются для установления картины фоновых магнитных полей, с умеренным - для получения картины маг-

нитного поля в активных областях, а фотогелиограммы с высоким пространственным разрешением – для получения косвенных сведений о магнитном поле активной области. Если рассматривать всю совокупность описанных в [21-26] закономерностей образования и развития активных областей, то действительно кажется невозможным связать возникновение активной области с выходом магнитного поля из-под фотосферы. Однако закономерности, установленные только по магнитограммам, могут быть удовлетворительно объяснены выходом трубки магнитного поля и предположением наличия некоторой связи между магнитным полем активной области и фоновыми магнитными полями. Что же касается анализа тонкоструктурных изменений, выполненного по фотогелиограммам, то он не может быть достаточно эффективным при изучении такого крупномасштабного процесса, как образование активной области, так как на поведении тонкоструктурных элементов в значительной степени будут сказываться мелкомасштабные процессы и, кроме того, физика ярких тонкоструктурных элементов не настолько хорошо понята, чтобы по ним можно было сделать вполне однозначное заключение о структуре магнитного поля.

В противовес возражениям Бумбы и др. можно привести еще тот аргумент, что, как будет показано ниже, изменение распределения продольного магнитного поля активной области как целого на стадии ее роста достаточно хорошо объясняется подъемом трубки магнитного поля.

Таким образом, наблюдательные данные не дают оснований для убедительных возражений против гипотезы о выходе магнитного поля из-под фотосферы. Магнитное поле под действием динамо-механизма усиливается в нижней части конвективной зоны и благодаря магнитной плавучести поднимается к поверхности. Как следует из наблюдений, скорость роста нового магнитного потока высока, следовательно, напряженность выходящего магнитного поля в среднем должна быть порядка сотен гаусс (в предположении волоконной природы магнитных полей – тысячи гаусс). До недавнего времени на величину всплывающего магнитного поля накладывались довольно серьезные ограничения. Паркер [27], полагая, что выталкивающая сила компенсируется только силой аэродинамического сопротивления, получил для величины критической напряженности, выше которой поле уже начинает всплывать, значение $\leq 10^2$ Гс. При движении к поверхности из-за уменьшения давления вещества трубка поля будет расширяться и напряженность станет еще меньше. Вайнштейн и Рузмайкин [28] показали, что учет "турбулентного диамагнетизма" конвективной зоны позволяет снять столь жесткие ограничения на величину магнитного поля: поле может удерживаться на дне конвективной зоны до напряженностей $\sim 10^3$ Гс. Шюслер [29] также получил, что магнитное поле может усилиться до значений 10^3-10^4 Гс.

В модели Майера и др. [30] выход магнитного поля на поверхность и его концентрация организуются конвекцией. Поднимающееся под дей-

ствием магнитной плавучести магнитное волокно захватывается конвективными потоками и выносится в центре супергранулы, затем основания его смещаются к границам конвективной ячейки, где после накопления достаточного магнитного потока образуются поры и пятна. Это совпадает с интерпретацией, которую дал своим наблюдениям Фрейзьер [11], однако, как уже говорилось, последняя недостаточно обоснована. Имеются и другие несоответствия с наблюдательными данными. Так, например, согласно [15] минимальное расстояние между компонентами bipolarной пары пор составляет $\sim 10''$, что значительно меньше диаметра супергранулы. Кроме того, наблюдаемый в фотосфере процесс концентрации магнитного поля не позволяет связать его с простым переносом конвективными движениями [20]. Нужно отметить, что согласно де ла Роса [31] картина собственных движений пор при формировании малых групп пятен, размеры которых не превышают супергранульных, заметно отличается от движений при образовании больших групп и допускает возможность конвективной концентрации магнитного поля. Де ла Роса предположил, что магнитное поле малых групп пятен выходит с меньшей глубины.

Разумеется, взаимодействие конвекции с магнитным полем может носить сложный характер. Так, например, Майер и др. [32], рассматривая прохождение волокон магнитного поля с потоками от 10^{17} до 10^{20} Мкс (согласно [33] первая величина близка потоку факельной гранулы, вторая – поры) через конвективный слой, получили, что волокна с малым потоком вблизи поверхности будут отбрасываться к границам конвективных ячеек, а волокна с большим потоком должны всплывать в центре ячейки. Динамика магнитного поля, которая должна наблюдаться в фотосфере в этом случае, будет сложной и, возможно, даже маскирующей определяющую роль конвекции. Однако, как было показано выше, выход магнитного поля носит массовый характер и, если полагать, что магнитное поле активной области образовано отдельными волокнами, то значительными должны быть гидродинамические силы, возникающие при движении волокон.

В модели Паркера [34-39] магнитное поле активной области формируется из отдельных волокон посредством гидродинамических сил, которые появляются при подъеме волокон под действием магнитной плавучести. Учитывается и наличие конвекции. Наблюдаемое на ранней стадии развития активной области движение малых холмов магнитного поля к пятну соответствующей полярности, а также слияние движущихся холмов друг с другом Паркер объяснил действием двух эффектов: 1) поднимающееся магнитное волокно движется в кильватере впереди идущего, поэтому оно увлекается направленным движением вещества и догоняет переднее волокно; 2) два магнитных волокна, поднимающихся параллельно друг другу, соединяются вследствие того, что давление вещества, расположенного между ними, будет меньше, чем снаружи от них (эффект

Бернулли). Магнитные волокна "сливаются" так, что создается впечатление единого целого, но под фотосферой они разделяются снова. Получаемая в результате картина магнитного поля в активной области очень многообразная и динамичная. Однако отмеченная в [20] нерегулярность наблюдаемого в фотосфере процесса концентрации магнитного поля говорит в пользу того, что он является следствием строения и подъема трубки магнитного поля. Следовательно, магнитная конструкция активной области должна формироваться в основном в глубоких слоях (под действием конвекции, гидродинамических сил и т.д.), а когда магнитное поле новой активной области появляется на поверхности, она уже меняется незначительно.

Модели, в которых наблюдаемая в фотосфере концентрация магнитного поля объясняется строением и динамикой трубки магнитного поля, созданы Пиддингтоном [40-42] и Цваном [33]. В модели Пиддингтона активная область образуется в результате всплывания петли тороидального магнитного поля, состоящего из множества волокон, скрученных в единый жгут. По его мнению вблизи поверхности из-за падения плотности верхняя часть петли будет дробиться на отдельные волокна, альфвеновские волны частично раскрутят жгут, хотя связь отдельных волокон со жгутом сохранится. Такая единая мощная трубка магнитного поля не подвержена влиянию конвекции. Однако модель Пиддингтона недостаточно обоснована и разработана и, в сущности, является феноменологической.

Цван [33] связывает образование активной области с подъемом петли однородного тороидального магнитного поля. При прохождении через конвективную зону трубка поля расщепляется на множество трубок, соответствующих пятнам, порам, факельным гранулам (механизм расщепления не рассматривается). Модель подкрепляется расчетами физических характеристик трубок поля, выполненными в квазистатическом приближении.

Разрушение активных областей

Стадии стабильного существования активной области нет. Витинский и Ихсанов [43], изучая изменение площадей групп пятен, установили, что после того, как площадь группы достигает максимального значения, начинается стадия разрушения, причем в большинстве случаев происходит быстрое разрушение группы. Гневашев [44] показал, что $\geq 90\%$ общего числа групп пятен живет не более II дней. Только небольшая часть всех групп вступает в стадию медленного разрушения, когда остается одно головное пятно и оно сохраняется в течение нескольких оборотов Солнца. Бумба [45] установил, что разрушение пятен в группе может происходить с двумя различными скоростями: при быстром разрушении пятно исчезает за несколько дней, а скорость уменьшения площади пятна при этом равна со скоростью увеличения ее на

стадии роста, при медленном - за несколько десятков дней. Большинство пятен подвергается быстрому разрушению. Возникает вопрос: что происходит с магнитным полем активной области на стадии разрушения?

Каулинг [1] попытался объяснить разрушение пятен омической диссипацией магнитного поля, содержащегося в них. В результате он получил слишком большое время жизни пятен, которое на несколько порядков превышало наблюдаемое. Копецкий и Куклин [46] показали, что хотя использование более точных значений электропроводности и характерного размера пятен позволяет получить более короткое время жизни пятен, на больших оптических глубинах расчетная зависимость времени жизни пятен от их площади противоречит наблюдательным данным. По предположению авторов [46], это противоречие может быть указанием на то, что омическая диссипация не является основной причиной разрушения пятен.

Другим возможным механизмом разрушения активных областей может быть вертикальное перемещение магнитного поля. Гопаск [5] обнаружил, что на стадии разрушения пятен в течение часа происходит заметное уменьшение напряженности продольного магнитного поля по всей активной области (при одновременном сохранении площади, ограниченной изолинией 50 Гс) и увеличение его раздробленности. Он связал это с погружением магнитного поля под фотосферу.

Однако до последних лет преобладала другая точка зрения, связанная главным образом с работой Лейтона [47]. Она заключается в том, что магнитные поля активных областей перераспределяются по поверхности Солнца. Лейтон представил активную область в виде двух источников магнитного поля противоположной полярности и рассчитал, что с ними будет происходить со временем. Под действием движений в супергранулах магнитные источники расширяются, на нулевой линии продольного поля происходит нейтрализация. Учитывалось и дифференциальное вращение. В результате действия этих процессов меридиональные составляющие магнитного поля отдельных активных областей объединяются, образуя общее поле дипольного типа. Полное "размазывание" магнитного поля активной области по поверхности должно произойти за время, превышающее 10 лет. Поскольку получилось такое хорошее согласие с циклом солнечной активности, утвердилось мнение, что магнитные поля активных областей перераспределяются по поверхности Солнца.

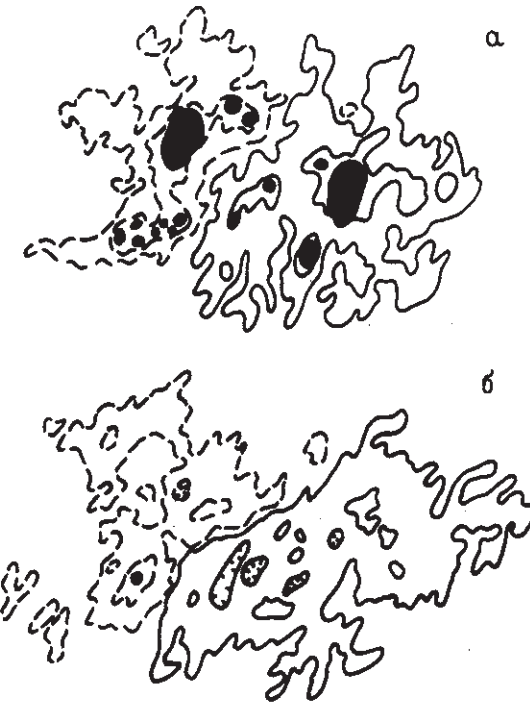
Попытки непосредственно пронаблюдать перераспределение магнитного поля старых факелов под действием движений в супергранулах, предпринятые Смитсоном [48] и Уорденом и Смитсоном [49], не увенчались успехом: в течение периода наблюдений не произошло заметного перераспределения факельного магнитного поля.

Имеются, однако, наблюдения, которые многими расцениваются как поддержка гипотезы о перераспределении магнитного поля. Речь идет о "вытекании" магнитного поля из разрушающихся пятен [19, 50, 51]. Наиболее подробно это явление исследовалось К. Харви и Дж. Харви [51]. Используя магнитограммы продольного магнитного поля, полученные на 40-канальном магнитографе обсерватории Китт-Пик, они показали, что от пятен, находящихся на стадии разрушения, движутся малые холмы магнитного поля (диаметром $\leq 2''$). Большая часть этих образований пересекает кольцеобразную область слабого магнитного поля, окружающую пятно, и сливается с магнитными полями, расположенными за ее пределами. Меньшая часть исчезает, не достигнув окружающих магнитных полей. Было сделано предположение, что наблюдаемое "вытекание" магнитного поля является причиной разрушения пятен. Но не было показано, что при этом происходит увеличение внепятенного магнитного потока, без чего нельзя говорить о перераспределении магнитного поля.

Определенный прогресс в изучении механизмов разрушения активных областей был достигнут в последние годы. Валленхорст и Говард [52] исследовали поведение магнитных потоков разрушающихся активных областей по магнитограммам обсерватории Маунт-Вилсон. Низкое пространственное разрешение используемого наблюдательного материала ($12,5''$) позволило определить границы активной области по контуру изолинии 10 Гс. Оказалось, что магнитный поток, заключенный внутри контура, очерчиваемого изолинией 10 Гс, в день или вблизи дня исчезновения пятен уменьшается, тогда как поток за пределами этого контура остается неизменным. Следовательно, нет перехода магнитного потока из активной области в прилегающие районы. Проведенные оценки показали, что исчезнувший поток превышает поток, содержащийся в пятнах.

В работах [18, 53] для определения величины внепятенного магнитного потока активной области использовались магнитограммы H_{\parallel} с пространственным разрешением $\sim 2'' \times 4''$, а магнитный поток пятен оценивался по данным визуальных измерений магнитного поля. Было показано, что на стадии разрушения пятен происходит систематическое уменьшение магнитного потока в активной области, причем одновременно уменьшаются поток пятен и внепятенный, что говорит в пользу отсутствия перехода магнитного потока из пятен в соседние районы. Поток пятен убывает более быстро по сравнению с внепятенным. Не обнаружено существенных изменений магнитных полей, окружающих активную область, которые можно было бы связать с переходом магнитного потока из активной области в прилегающие районы. Скорость уменьшения магнитного потока в активной области при разрушении пятен по порядку величины сравнима со скоростью увеличения его на стадии роста.

На рис. 1 показаны две карты распределения продольного магнитного поля для разрушающейся активной области (проведены изолинии 28 и



Р и с. 1. Карты распределения продольного магнитного поля для разрушающейся активной области: а - для 18 сентября 1982 г., 0119 UT; б - для 20 сентября 1982 г., 0546 UT;
 — магнитное поле головной полярности, --- хвостовой полярности, ■ пятна и поры

201 Гс), полученные на панорамном магнитографе, здесь же схематически показаны пятна и поры. Карты разделены промежутком времени $\sim 52^h$. Видно, что площадь, ограниченная изолинией 28 Гс, практически не изменилась, тогда как площадь, ограниченная изолинией 201 Гс, существенно уменьшилась. Изменения магнитного поля происходят по всей активной области при относительном постоянстве ее размеров, что является закономерным для стадии разрушения активной области.

Систематическое уменьшение магнитного потока в разрушающейся активной области по магнитограммам обсерватории Маунт-Вилсон с пространственным разрешением $5''$ зарегистрировали также Валленхорст и Топка [54]. Они отмечали, что от разрушающегося пятна отделялись малые холмы магнитного поля, двигаясь радиально от пятна и посте-

пенно исчезая. Движения происходили в секторе размером 160° . Авторы предположили, что пятно было разрушено образовавшейся по соседству супергранулой. Однако это не дает указаний на причину исчезновения магнитного поля в пределах всей активной области. Согласно [18,54] разрушение активной области не сопровождается регулярным сближением или раздвижением полярностей.

Таким образом, наблюдательные данные убедительно свидетельствуют о том, что на стадии разрушения активной области происходит действительное исчезновение магнитного поля из фотосферы. Поскольку результаты наблюдений свидетельствуют против гипотезы о перераспределении магнитного поля активных областей по поверхности Солнца, необходимо найти другую причину разрушения активных областей.

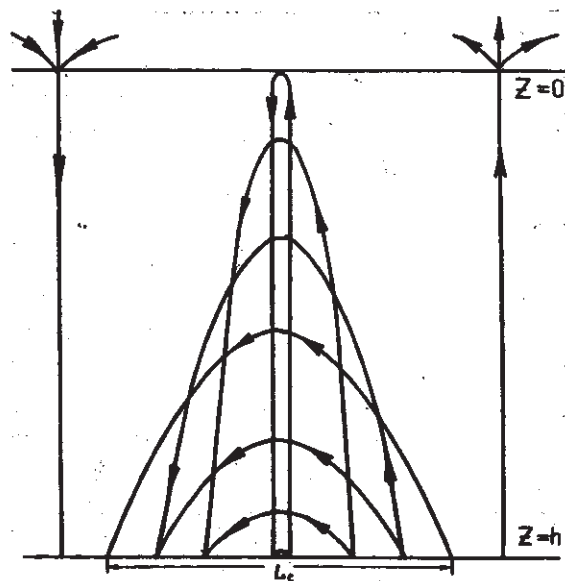
Как уже говорилось ранее, омическая диссипация также не может быть ответственна за исчезновение магнитного поля пятен. В то же время развитие механизмов турбулентной диссипации магнитного поля позволило получить оценки времени распада пятен, близкие к действительным. Так, например, Иванов и Максимов [55] получили, что магнитное поле напряженностью 3000 Гс в пятне диаметром 17000 км под действием двумерной турбулентности полностью диссипирует в течение 70 сут. Разумеется, справедливость предположения двумерной турбулентности в пятнах, требующей наличия строго вертикального магнитного поля, может быть спорной, тем не менее, данная работа показывает, что в разрушении долгоживущих пятен диссипативные процессы могут играть существенную роль. Имеются работы, которые дают и более высокую скорость диссипации магнитного поля (см., например, [56]), близкую к скорости быстрого разрушения пятен. Однако при анализе картины изменений магнитного поля в разрушающихся активных областях создается впечатление, что на стадии быстрого разрушения пятен роль диссипативных процессов не может быть определяющей.

Дело в том, что изменения магнитного поля на стадиях роста и разрушения активной области очень сходны между собой (хотя имеются и некоторые различия) и это наводит на мысль об общности физических процессов, ответственных за обе стадии. В табл. I указаны основные закономерности поведения магнитного поля при росте и разрушении активной области. Поскольку закономерности стадии роста объясняются выходом магнитного поля из-под фотосферы, можно предположить, что закономерности стадии разрушения вызваны обратным процессом — погружением. Если активная область состоит из отдельных магнитных волокон, то разрушение ее может осуществляться путем погружения отдельных волокон. Такое предположение высказали Валленхорст и Топка [54]. В этом случае попарно связанные элементы продольного магнитного поля, размер которых значительно меньше элемента разрешения, будут двигаться по направлению к нулевой линии и исчезать там. Никакие заметные изменения на нулевой линии продольного магнитного поля наблю-

Таблица I

Рост активной области	Разрушение пятен
Высокая скорость увеличения магнитного потока.	Высокая скорость уменьшения магнитного потока.
Увеличение магнитного потока пятен сопровождается увеличением внепятенного магнитного потока.	Уменьшение магнитного потока пятен сопровождается уменьшением внепятенного магнитного потока.
Появление нового магнитного поля идет по всей активной области.	Исчезновение магнитного поля идет по всей активной области.
Увеличение площади активной области.	Относительная неизменность площади активной области.
Раздвижение противоположных полярностей.	Отсутствие регулярного сближения или раздвижения полярностей.
На начальной стадии развития активной области распределение $H_{ }$ в диапазоне внепятенных напряженностей не подчиняется зависимости (I); β_{oi} не согласуются друг с другом и возрастает по мере увеличения l (см. ниже в тексте).	Когда большая часть пятен разрушится, распределение $H_{ }$ в диапазоне внепятенных напряженностей не подчиняется зависимости (I); β_{oi} не согласуются друг с другом и возрастает по мере увеличения i (см. ниже по тексту).

даться не будут. Теоретическое рассмотрение этого вопроса провел Паркер [57]. Он полагает, что магнитные волокна, образующие активную область, закреплены на некоторой глубине h в конвективной зоне, где энергия конвективных движений больше энергии магнитного поля; расстояние между основаниями волокон L превышает некоторое критическое L_c . Если $L < L_c$, то волокно целиком располагается ниже фотосферы в одном из двух устойчивых состояний, отличающихся кривизной волокон, причем состояние с меньшей кривизной более устойчиво (см. рис. 2, взятый из [57]). При наименьшем L петля, образованная волоконном в менее устойчивом состоянии, достигает поверхности, тогда как в более устойчивом состоянии волокно полностью лежит в глубине конвективной зоны; когда L превысит L_c , волокно начнет всплывать, выйдет на поверхность и расширится в вакуум. Если теперь на основании волокон в конвективной зоне будет действовать сила, толкающая их по направлению друг к другу, то расстояние между ними будет сокращаться до наименьшего. При этом магнитное натяжение сожмет рас-



Р и с. 2. Равновесные состояния погруженных в конвективную зону магнитных волокон

ширившись в вакуум вершину волокна так, что она опустится до поверхности, т.е. волокно окажется в одном из устойчивых состояний для наименьшего L_c , в котором могут находиться волокна, погруженные в конвективную зону. Из этого состояния при дополнительном возмущении волокно перейдет в более устойчивое состояние с меньшей кривизной, которому соответствует положение волокна в глубине конвективной зоны. Это приведет к исчезновению соответствующего магнитного потока из фотосферы.

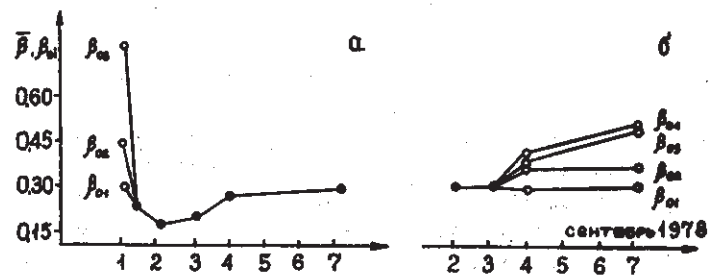
Если считать, что активная область образуется не отдельными магнитными волокнами, а единой трубкой магнитного поля, то картину изменений магнитного поля в разрушающейся активной области можно объяснить, предположив, что при погружении форма трубки существенно отличается от той, которая была при подъеме. В процессе всплытия трубка переходила из более плотных слоев в менее плотные, что приводило к ее расширению. Затем, когда трубка начнет погружаться, т.е. переходить в более плотные слои, она сожмется, но первоначальную форму, очевидно, не примет, а будет иметь более плоскую вершину. При погружении такой трубки переход продольного магнитного поля в поперечное будет почти мгновенным, в результате чего исчезновение магнитного поля не будет сопровождаться сближением противоположных полярностей.

Эволюция распределения продольной составляющей внепятенного магнитного поля активной области

В работах [18,53] автором было показано, что в течение большей части периода жизни активной области, связанного с существованием группы пятен, распределение продольного магнитного поля в диапазоне внепятенных напряженностей ($\sim 30-200$ Гс) подчиняется зависимости

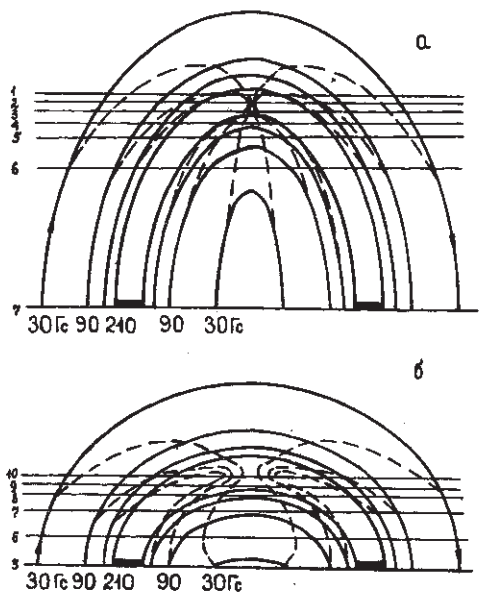
$$S_i = S_0 \exp(-\bar{\beta} H_{ii}^i / H_{ii}^0), \quad (I)$$

где $H_{ii}^0 \approx 30$ Гс, S_0 - площадь, ограниченная изолинией H_{ii}^0 , а S_i - изолинией H_{ii}^i . Формула (I) является интерполяционной, значения H_{ii} составляли 60, 90, 120 и 200 Гс или 60, 98, 113 и 201 Гс (в зависимости от режима работы магнитографа). Параметр $\bar{\beta}$ представляет собой арифметическое среднее параметров β_{oi} , определявшихся для каждой пары S_0 и S_i , и является некоторой характеристикой среднего горизонтального градиента H_{ii} (чем больше $\bar{\beta}$, тем меньше градиент H_{ii}). Наименьшего значения ($\sim 0,17$) параметр $\bar{\beta}$ достигает после появления развитых главных пятен, максимального значения ($\sim 0,30-0,31$) - в конце периода существования развитых пятен (рис. 3). После того, как большая часть пятен разрушится, а также в начальный период жизни активной области, когда еще нет развитых пятен, распределение продольного магнитного поля не подчиняется указанной зависимости, параметры β_{oi} не согласуются друг с другом и возрастают по мере увеличения i (это уже отмечалось в табл. I).



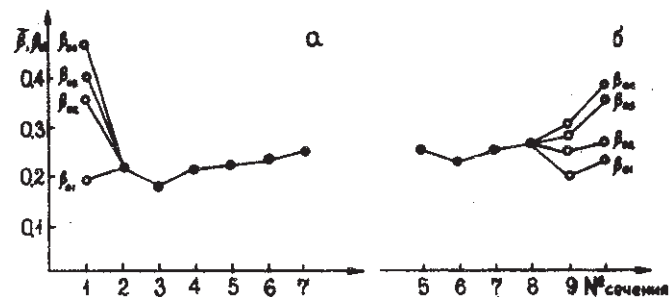
Р и с. 3. Изменения $\bar{\beta}$ в процессе развития активной области и β_{oi} - в случае невыполнения зависимости (I): а - для растущей активной области; б - для разрушающейся; — $\bar{\beta}$, — β_{oi} .

Можно показать, что наблюдаемая эволюция распределения продольной составляющей внепятенного магнитного поля активной области как целого на стадии роста активной области удовлетворительно объясняется подъемом, а на стадии разрушения - погружением трубки магнитного поля. Пусть поднимающаяся трубка магнитного поля постоянного



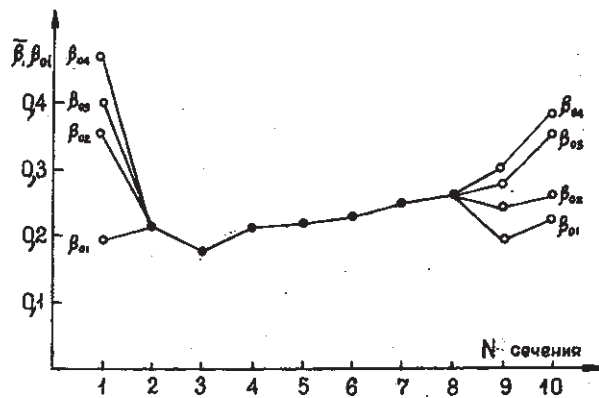
Р и с. 4. Трубки магнитного поля: а - поднимающаяся; б - погружающаяся; ---- изолинии $H_{||}$, — сечения трубок; — области пятенного магнитного поля

поперечного сечения имеет форму полуэллипса с острой вершиной (см. рис.4,а), а погружающаяся - форму полуэллипса с плоской вершиной (рис.4,б). Напряженность магнитного поля растет по направлению к оси трубки в соответствии с формулой (1) с $\beta = 0,25$. На оси трубки располагается магнитное поле пятен, распределение которого неизвестно. Штриховой линией показаны изолинии продольного магнитного поля $H_{||} = H \cos \gamma$, где γ - угол между вектором магнитного поля и вертикалью. При проведении изолиний $H_{||}$ в области пятенного магнитного поля возникает неопределенность из-за того, что распределение магнитного поля здесь неизвестно. Используем то обстоятельство, что в молодых активных областях на нулевой линии продольного магнитного поля наблюдаются высокие горизонтальные градиенты $H_{||}$, а по мере старения активной области они уменьшаются [5,58]. Поэтому в поднимающейся трубке изолинии $H_{||}$ вблизи нулевой линии должны располагаться тесно, как показано на рис.4,а. Такая же картина получится, если предположить, что на оси трубки, изображенной на рис.4,а, располагается магнитное поле напряженностью 2000 Гс (что вполне реально). В погружающейся трубке (рис.4,б) изолинии $H_{||}$ вблизи нулевой линии



Р и с. 5. Изменения $\bar{\beta}$ в зависимости от номера сечения трубок и β_{oi} - в случае невыполнения зависимости (1): а - для поднимающейся трубки магнитного поля; б - для погружающейся трубки магнитного поля; — $\bar{\beta}$, - β_{oi}

проведены с тем расчетом, чтобы градиент $H_{||}$ был на порядок меньше, чем в поднимающейся трубке. Возможно, изображенная на рис.4,б погружающаяся трубка недостаточно сплюснута, чтобы обеспечить такой малый градиент $H_{||}$, но пока пренебрежем этим эффектом. Через трубки проведен ряд горизонтальных сечений, которые отождествим с сечениями плоскости фотосферы. Присвоим сечениям поднимающейся трубки порядковые номера с 1 по 7 в направлении сверху вниз (увеличение номера сечения соответствует подъему трубки), а погружающейся - с 5 по 10 в направлении снизу вверх (увеличение номера сечения соответствует погружению трубки). Определим площади, ограниченные i -ми изолиниями $H_{||}$ для различных сечений обеих трубок (т.е. попросту измерим длины соответствующих отрезков сечений) и проверим возможность применения формулы (1) для описания распределения продольного магнитного поля в интервале напряженностей 30-150 Гс с шагом 30 Гс. Результаты приведены на рис.5. Видно, что полученная картина изменения $\bar{\beta}, \beta_{oi}$ для поднимающейся и погружающейся (исключая разрез 5) трубок магнитного поля хорошо согласуется с результатами наблюдений, полученными соответственно для растущей и разрушающейся активных областей. Отметим, что картина изменения $\bar{\beta}$ для сечений 6,7,8 погружающейся трубки магнитного поля, на которых только в незначительной степени должна сказываться неопределенность проведения изолиний $H_{||}$ в области пятен, противоположна картине, имевшей место для соответствующих сечений поднимающейся трубки. Это вызвано изменением формы трубки: она стала более плоской. Очевидно, если в действительности погружающаяся трубка магнитного поля имеет еще более плоскую форму, чем это изображено на рис.4,б (что может потребоваться для обеспечения низких градиентов $H_{||}$ на нулевой линии, так как именно благодаря этому обстоятельству для сечений 9 и 10 выполняется тре-



Р и с. 6. Расчетное изменение $\bar{\beta}$ в процессе эволюции активной области и β_{oi} - в случае невыполнения зависимости (I); \circ - $\bar{\beta}$, \bullet - β_{oi}

буемое рассогласование параметров β_{oi}), то рост $\bar{\beta}$ с номером сечения усилится, следовательно, согласие с наблюдательными данными не нарушится.

Если включить в рассмотрение сечение 5 для погружающейся трубки, то согласие с наблюдательными данными несколько ухудшается. Чтобы избежать этого, предположим, что подъем трубки магнитного поля происходит до уровня сечения 6, а затем начинается погружение. "Сошьем" графики $(\bar{\beta}, \beta_{oi})$ для поднимающейся и погружающейся трубок магнитного поля в точке 6, а точки 7 на рис.5а и 5 на рис.5б отбросим. Тогда получим изменение $(\bar{\beta}, \beta_{oi})$ в процессе эволюции активной области (рис.6), хорошо согласующееся с эмпирической схемой, изложенной выше. Нужно еще отметить, что площади, занятые сильным продольным полем, в процессе погружения трубки будут быстро убывать, тогда как площадь, ограниченная внешней изолинией, за то же время меняется незначительно (рис.4,б). Это также согласуется с наблюдениями.

Таким образом, эволюция распределения продольного магнитного поля может быть обусловлена действием двух факторов: уменьшением угла наклона вектора магнитного поля при переходе от вершины трубки к основаниям и ростом напряженности магнитного поля по направлению к оси трубки. Разумеется, изображенные на рис.4 трубки магнитного поля сильно идеализированы. Реальная трубка магнитного поля должна иметь раздробленную вершину. Однако и в реальной трубке напряженность магнитного поля возрастает по направлению к оси трубки, а угол наклона вектора магнитного поля уменьшается при переходе от вершины трубки к основаниям.

Согласно предложенной интерпретации распределение магнитного поля в трубке к моменту выхода ее на поверхность вполне определенное и в процессе выхода существенно не меняется.

Заключение

Наблюдательные данные согласуются с предположением об образовании активной области в результате выхода магнитного поля из-под фотосферы. Нет предварительного накопления магнитного потока в фотосфере, и выход нового магнитного поля, и формирование активной области происходят одновременно. Зарождение активной области на стыках супергранул можно объяснить влиянием конвекции на выход магнитного поля. Тем не менее, в динамике магнитного поля развивающихся активных областей нет видимых проявлений конвекции. Наблюдаемое на стадии роста активной области распределение продольной составляющей внепятенного магнитного поля согласуется с предположением о подъеме трубки, имеющей вполне определенное распределение поля, которое в процессе выхода трубки на поверхность существенно не меняется.

Стадия разрушения активной области изучена менее детально. Однако можно с достаточной уверенностью утверждать, что во время быстрого разрушения пятен происходит действительное исчезновение значительной части магнитного потока активной области (поток пятен + часть внепятенного потока) из фотосферы. Это говорит против того, что быстрое разрушение пятен связано, главным образом, с перераспределением магнитного поля по поверхности Солнца (механизм Лейтона). Возможными механизмами исчезновения магнитного потока на стадии быстрого разрушения пятен являются диссипация и вертикальное перемещение магнитного поля. Сходство картин изменения магнитного поля в активной области на стадиях роста и разрушения позволяет связать быстрое разрушение активной области с погружением (по крайней мере части) магнитного поля под фотосферу. Поведение магнитного поля активной области после завершения стадии быстрого разрушения пятен практически не изучено.

Дальнейший прогресс в изучении механизмов возникновения и разрушения активных областей, очевидно, следует связывать не только с достижением высокого пространственного и временного разрешения при наблюдениях продольного магнитного поля, но и с получением качественной информации о полном векторе магнитного поля с достаточно хорошим временем (несколько часов) и пространственным (2"-4") разрешением. Знание структуры и динамики поперечного магнитного поля позволит конкретизировать наши представления об образовании и разрушении активных областей. В настоящее время имеются приборы (вектор-магнитограф /59/, стоковский поляриметр /60/), способные проводить качественную регистрацию вектора магнитного поля.

Л и т е р а т у р а

1. Cowling J.G. - Mon.Not.Roy.Astron.Soc., 1946, v.106, p.218-224.
2. Parker E.N. - Astrophys.J., 1955, v.121, No.2, p.491-507.
3. Bumba V., Howard R. - Astrophys.J., 1965, v.141, No.4, p.1492-1501.
4. Simon G.W., Leighton R.B. - Astrophys.J., 1964, v.140, No.3, p.1120-1147.
5. Гопаск С.И. - Изв.Крымск.астрофиз.обсерв., 1967, т.36, с.56-68.
6. Витинский Ю.И., Иксанов Р.Н. - В кн.: Солнечные данные, 1964, № 10, с.57-63.
7. Барру М.К.В., Grigorjev V.M., Stepanov V.S. - Solar Phys., 1968, v.4, No.4, p.409-421.
8. Пономаренко Ю.Б. - Астрон.ж., 1970, т.47, вып.1, с.98-102.
9. Howard R., Stenflo J.O. - Solar Phys., 1972, v.22, No.2, p.402-417.
10. Frazier E.N., Stenflo J.O. - Solar Phys., 1972, v.27, No.2, p.330-346.
11. Frazier E.N. - Solar Phys., 1972, v.26, No.1, p.130-141.
12. Bruzek A. - Solar Phys., 1967, v.2, No.4, p.451-461.
13. Schoolman St.A. - Solar Phys., 1973, v.32, No.2, p.379-388.
14. Glackin D.L. - Solar Phys., 1975, v.43, No.2, p.317-326.
15. Born R. - Solar Phys., 1974, v.38, No.1, p.127-131.
16. Кубичела А. - В кн.: Возникновение и эволюция активных областей на Солнце. М.: Наука, 1976, с.15-20.
17. Григорьев В.М., Ермакова Л.В. - В кн.: Солнечные данные, 1976, № 4, с.83-92.
18. Ермакова Л.В. - В кн.: Исследования по геомагнетизму, аэронауке и физике Солнца. М.: Наука, 1982, вып.62, с.257-268.
19. Vrabec D. - Int.Astron.Union Symp., 1974, No.56, p.201-229.
20. Ermakova L.V., Kotrc P. - Bull.Astron.Inst. Czechosl., 1979, v.30, No.6, p.334-338.
21. Bumba V., Tomashek P. - Phys.Solar-Terrestrial, 1980, No.13, s.35-36.
22. Bumba V. - Bull.Astron.Inst.Czechosl., 1981, v.32, No.3, p.129-143.
23. Bumba V., Suda J. - Bull.Astron.Inst.Czechosl., 1983, v.34, No.6, p.349-354.
24. Bumba V., Suda J. - Bull.Astron.Inst.Czechosl., 1984, v.35, No.1, p.28-39.
25. Bumba V. - Publ.Debrecen Heliophys.Observ., 1983, v.5, p.1, p.47-70.
26. Bumba V. - Bull.Astron. Inst. Czechosl., 1983, v.34, No.4, p.219-229.
27. Parker E.N. - Astrophys.J., 1975, v.198, No.1, p.205-209.
28. Ruzmaikin A.A., Vainshtein S.J. - Astrophys. and Space Sci., 1978, v.57, No.1, p.195-202.
29. Schüller M. - Astron.Astrophys., 1979, v.71, No.1-2, p.79-91.
30. Meyer F., Schmidt H.U., Weiss N.O., Wilson P.R. - Mon.Notic. Roy. Astron.Soc., 1974, v.169, No.1, p.35-57.
31. De la Rosa J.I. Garcia - Solar Phys., 1981, v.74, No.1, p.117.
32. Meyer F., Schmidt H.U., Simon G.W., Weiss N.O. - Astron. Astrophys., 1979, v.76, No.1, p.35-45.
33. Zwaan C. - Solar Phys., 1978, v.60, No.2, p.213-240.
34. Parker E.N. - Astrophys.J., 1979, v.230, No.3, p.905-913.
35. Parker E.N. - Astrophys.J., 1978, v.222, No.1, p.357-364.
36. Parker E.N. - Astrophys.J., 1979, v.230, No.3, p.914-923.
37. Parker E.N. - Astrophys.J., 1979, v.231, No.1, p.250-259.
38. Parker E.N. - Astrophys.J., 1979, v.231, No.1, p.260-269.
39. Parker E.N. - Astrophys.J., 1979, v.231, No.1, p.270-276.
40. Piddington J.A. - Astrophys. Space Sci., 1975, v.34, No.2, p.347-362.
41. Piddington J.A. - Astrophys. Space Sci., 1975, v.40, No.1, p.73-90.
42. Piddington J.A. - Astrophys. Space Sci., 1978, v.55, No.2, p.401-425.
43. Витинский Ю.И., Иксанов Р.Н. - Изв.ГАО, 1966, т.24, вып.4, с.20-39.
44. Гневашев М.Н. - Цирк.Главной астроном.обсерв.в Пулкове, 1938, № 24, с.27-40.
45. Bumba V. - Bull. Astron. Inst. Czechosl., 1963, v.14, No.1, p.91-97.
46. Kopecky M., Kuklin G.V. - Bull. Astron. Inst. Czechosl., 1966, v.17, No.2, p.45-57.
47. Leighton R.B. - Astrophys.J., 1964, v.140, No.4, p.1547-1562.
48. Smithson R.C. - Solar Phys., 1973, v.29, No.2, p.365-382.
49. Worden S.P., Simon G.W. - Solar Phys., 1976, v.46, No.1, p.73-91.
50. Sheeley N.R., Jr. - Solar Phys., 1972, v.25, No.1, p.98-103.
51. Harvey K., Harvey J. - Solar Phys., 1973, v.28, No.1, p.61-71.
52. Wallenhorst S.G., Howard R. - Solar Phys., 1982, v.76, No.2, p.203-209.
53. Ермакова Л.В. - В кн.: Исследования по геомагнетизму, аэронауке и физике Солнца. М.: Наука, 1984, вып.68, с.99-108.
54. Wallenhorst S.G., Торка К.Р. - Solar Phys., 1982, v.81, No.1, p.33-46.
55. Иванов С.Д., Максимов В.П. - Письма в АЖ, 1978, т.4, № 5, с.232-234.
56. Криводубский В.Н. - В кн.: Солнечные данные, 1984, № II, с.51-57.
57. Parker E.N. - Astrophys.J., 1984, v.280, No.1, p.423-427.
58. Ермакова Л.В. - В кн.: Исследования по геомагнетизму, аэронауке и физике Солнца. М.: Наука, 1980, вып.52, с.16-24.
59. Степанов В.Е., Григорьев В.М., Кобанов Н.И., Осак Б.Ф. - В кн.: Исследования по геомагнетизму, аэронауке и физике Солнца. М.: Наука, 1975, вып.37, с.147-152.

60. House L.L., Baur J.G., Hull H.K. - Solar Phys., 1975, v.45,
No. 2, p.495-500.

Сибирский институт земного магнетизма,
ионосферы и распространения радиоволн СО АН СССР Статья поступила
в январе 1985 г.