

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
ГЛАВНАЯ АСТРОНОМИЧЕСКАЯ ОБСЕРВАТОРИЯ

На правах рукописи

Лившиц Илья Моисеевич

КРУПНОМАСШТАБНЫЕ МАГНИТНЫЕ ПОЛЯ
И АКТИВНОСТЬ ЗВЕЗД
ПОЗДНИХ СПЕКТРАЛЬНЫХ КЛАССОВ

01.03.02 — астрофизика, радиоастрономия

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург — 2002

Работа выполнена в Институте земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн Российской академии наук

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук

Обридко В.Н.

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук

Макаров В.И.

доктор физико-математических наук, профессор Соколов Д.Д.

Ведущая организация:

Государственный астрономический институт им. П. К. Штернберга
Москва, Россия

Защита состоится "26" апреля 2002 г. в 11 часов 30 минут на заседании Диссертационного совета К 002.120.01 по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук в Главной астрономической обсерватории Российской академии наук по адресу:
196140, Санкт-Петербург, Пулковское шоссе, д.65/1, ГАО РАН

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГАО РАН.

Автореферат разослан "18" марта 2002 г.

Ученый секретарь Диссертационного совета
кандидат физико-математических наук

Милецкий Е.В.

Актуальность работы

За последние 20-30 лет в результате проведения наблюдений в рентгеновском, ультрафиолетовом и оптическом диапазонах звезд, близких по спектру к Солнцу, сформировалось новое направление астрофизики. Оно нацелено в основном на исследование на звездах явлений активности типа развивающихся на Солнце. Весь накопленный опыт исследований Солнца используется при этом для анализа все возрастающего количества информации об активных звездах поздних спектральных классов. С другой стороны, специалисты, занимающиеся физикой Солнца, изучают все многообразие солнечных явлений на единственном объекте с фиксированной массой, радиусом, светимостью и возрастом. Исследование аналогичных явлений на звездах позволяет лучше понять причины возникновения активности и то, в какой период жизни звезды она возникает. Общность тех или иных механизмов, предлагаемых для объяснения солнечных явлений, проверяется сегодня методами солнечно-звездной физики. Разумеется, результаты изучения солнечного ветра, корональных выбросов массы и мощных нестационарных процессов на Солнце на основе анализа данных о других звездах оказываются полезны для исследования проблем космической погоды – предсказания условий в околоземном космическом пространстве.

Предлагаемая работа посвящена одному из аспектов этого нового актуального направления. На протяжении нескольких веков изучения солнечной активности ее традиционно связывали с солнечными пятнами, точнее говоря, с эволюцией локальных магнитных полей. В последние годы, благодаря исследованиям, проводимым в Главной (Пулковской) астрономической обсерватории, в ИЗМИРАНе и в Стэнфордском университете, начала выясняться первичность крупномасштабных, а не локальных магнитных полей в формировании процессов циклической активности (Makarov V.I., Tlatov A.G., Obridko V.N. et al. *Solar Phys.* 2001. V.198. P.409). Глобальное магнитное поле в своей динамике опережает локальные поля на 5–6 лет. Кроме того, существует несколько прямых и косвенных указаний на то, что явления в различных активных областях, в далеко разнесенных частях солнечной поверхности оказываются не независимыми, а связанными между собой, например, единой токовой системой. При этом чрезвычайно актуальным оказалось выяснить, не выражено ли на каких-либо звездах влияние крупномасштабных магнитных полей на активность более отчетливо, чем на Солнце.

Будем называть далее активной поздней звездой такую, на которой зарегистрирован хотя бы один из процессов, аналогичных развивающимся в ходе солнечного цикла (пятна, вспышки и т.п.). Активность присуща звездам спектрального класса позже F5, обладающим подфотосферной конвективной зоной, и уровень активности сильно зависит от скорости вращения. Это считается аргументом в пользу механизма динамо, приводящего к усилению магнитных полей и развитию активности. Высокая и нерегулярная активность характерна для звезд сравнительно небольшого возраста, в то время, как циклические изменения с не очень большой амплитудой наблюдаются на звездах, уже достигших главной последовательности.

Большинство таких звезд являются карликами, расположенными в солнечной окрестности. Активных одиночных звезд повышенной светимости обнаружено очень мало. С другой стороны, высокая поверхностная активность обнаружена на поздних звездах повышенной светимости (субгигантах и гигантах), которые являются компонентами двойных систем типа RS Гончих Псов (RS CVn). Наблюдается около 200 таких систем, состоящих чаще всего из двух поздних звезд, причем уровень активности более поздней компоненты как правило значительно превосходит активность одиночных звезд. Двойные типа RS CVn в своей эволюции уже сошли с главной последовательности, и высокий уровень их активности сохраняется длительное время из-за эффекта синхронизации орбитального и осевого вращений. Объектами исследования диссертации являются поздние звезды главной последовательности, возраст которых сравним с солнечным, и субгиганты, входящие в двойные системы типа RS CVn.

Если размер МГД-конфигурации составляет от 0.3 до 1 радиуса Солнца или рассматриваемой звезды, то такие поля будем относить к крупномасштабным. Среди них термин "глобальное" используем для самого большого масштаба – осредненного поля дипольного типа. Возможности современных солнечных наблюдений позволяют непосредственно проследить сложное динамическое поведение крупномасштабных структур. Стало ясно, что некоторые долгоживущие, квазистационарные процессы на Солнце, связанные с циклом активности, захватывают большую часть или даже всю его поверхность. Это относится к системам волокон (протуберанцев) и громадных стримеров над ними, к корональным дырам и полярным факелам. Форма солнечной короны изменяется в ходе цикла, отражая эволюцию полей самого большого масштаба. Структура межпланетного

магнитного поля и формирование высокоскоростных потоков солнечного ветра из дыр и низкоскоростного истечения из стримеров определяются крупномасштабными полями.

Наглядно проявляются огромные масштабы как арочных систем, развивающихся при длительных вспышках, так и корональных выбросов массы (СМЕ). Начавшись в некоторой активной области, нестационарный процесс быстро распространяется на огромные расстояния по направлениям, определяемым структурой крупномасштабного магнитного поля.

Кроме некоторых проблем, связанных с выделением слабых крупномасштабных магнитных полей на Солнце и с исследованием их влияния на квазистационарные и нестационарные процессы, во многих случаях трудно решить, какие стороны этого влияния существенны для развития активности в целом, а какие относятся к особенностям, присущим данной активной области. Здесь было бы полезно проанализировать соответствующие процессы, развивающиеся на активных поздних звездах. Хотя общая идея неявно высказывалась ранее, данная работа является первой попыткой ее конкретной реализации. Разумеется, выполнение этого исследования в целом было бы невозможно без достигнутого в последнее время прогресса во внеатмосферных и наземных наблюдениях звезд поздних спектральных классов.

Целями работы являются:

- анализ первых результатов наблюдений глобальных магнитных полей поздних звезд, использующий опыт аналогичных солнечных исследований;
- выявление реальной роли локальных и крупномасштабных магнитных полей на основе анализа вспышек, развивающихся на Солнце и поздних звездах различных светимостей и характеризующихся полным энерговыделением $10^{27} - 10^{37}$ эрг;
- анализ результатов спектральных наблюдений в коротковолновом и рентгеновском диапазонах для выявления свидетельств истечения плазмы из крупномасштабных корональных структур на активных поздних звездах.

При выполнении работы применялись методы численного моделирования газодинамических процессов, развивающихся в длительных звездных вспышках и в области взаимодействия ветров в двойных системах типа RS CVn. При этом использован достаточно простой подход, который вполне адекватен появившимся первым наблюдательным результатам. Особенности статистических методов, исполь-

зованных при анализе солнечных наблюдений, определяются необходимостью дальнейшего сопоставления с результатами наблюдений соответствующих процессов на звездах.

Структура, объем и основное содержание диссертации

Диссертация состоит из Введения, трех глав, Заключения и Приложения. Общий объем диссертации 107 страниц, в том числе 23 рисунка и 114 библиографических ссылок.

Во Введении обосновывается актуальность работы, дан краткий обзор результатов изучения крупномасштабных магнитных полей на Солнце, сформулированы цели исследования и положения, выносимые на защиту. Здесь же изложены результаты предварительного исследования связи рентгеновских потоков поздних субгигантов в составе двойных систем типа RS CVn с периодом осевого вращения, существенного для постановки задачи в целом.

В Главе I проанализирован ряд наблюдений магнитного поля Солнца как звезды (общего магнитного поля Солнца – ОМПС). Эти наблюдения были начаты в Крымской астрофизической обсерватории в 1967 г. и проводились впоследствии на обсерваториях Маунт-Вилсон, в Стэнфорде (США) и в Институте солнечно-земной физики СО РАН. Наше рассмотрение основывается на ряде ежедневных значений поля Солнца как звезды за период с 1975 по 1996 гг., полученных в Стэнфорде. При этом использованы некоторые полученные ранее результаты, в частности, значение периода колебаний ОМПС 27.00 ± 0.05 суток (Котов и др. Астрон. журн., 1999, Т.76. С.218 ; Ханейчук, Астрон. журн., 1999, Т.76.С.385). Прежде всего, значения ОМПС были сопоставлены со значением поля, полученного в результате интегрирования Стэнфордских синоптических карт в разрешении $3' \times 3'$ минуты. Тем самым для современных наблюдений было подтверждено заключение о том, что ОМПС действительно совпадает со средним значением напряженности поля в центральной части диска (в интервале $\pm 50^\circ$ по широте и долготе).

На примере XX и XXI циклов активности показано, что квазисинусоидальные изменения появляются, чаще всего, в виде отдельных цугов, длящихся 5–6 кэррингтоновских оборота (CR), в небольшой период времени на фазе роста активности в цикле, и затем после максимума и дольше всего существуют на фазе спада. В эти моменты дипольная составляющая магнитного поля наиболее отчетливо выражена. Было проведено детальное сравнение свойств 27-дневных коле-

баний на фазе спада циклической активности и в момент, близкий к переполусовке знака глобального поля. Найден способ количественной оценки устойчивости колебаний, и показано, что на фазе спада, в 1984 г. квазисинусоидальные колебания стабильны. Эта ситуация условно названа "наклонным" диполем. С другой стороны, период в 1991 г., когда значения ОМПС были максимальны (более 1 Гс), характеризовался сильными флуктуациями амплитуды волн, длительности конкретных колебаний и их формы. Эта ситуация "горизонтального диполя" реализуется на Солнце в эпохи высокой активности. В эти же периоды времени отмечаются нарушения фазовой зависимости ОМПС, связанные с появлением в центральной части диска больших комплексов активности с преимущественной полярностью одного или нескольких пятен.

Во разделе I.2 упоминаются результаты определения магнитных полей в звездных пятнах и проводится первый анализ информации о глобальных магнитных полях на активных поздних звездах. При этом анализируются результаты первых наблюдений продольной компоненты магнитного поля от поверхности всей звезды. Эти наблюдения получены С.И.Плачиндой, Т.Н.Тарасовой и их коллегами на 2.6-м телескопе им.Г.А.Шайна Крымской астрофизической обсерватории. На нескольких поздних звездах главной последовательности время от времени регистрировались поля с напряженностью 10–20 Гс при среднеквадратической ошибке 2–3 Гс. Эти значения более, чем на порядок превосходят среднемесячные значения сигнала от Солнца как звезды за весь 30-летний период наблюдений Солнца этим методом. С точки зрения рассмотрения, проведенного в первом параграфе для Солнца, наибольший интерес представляют данные о вращательной модуляции сигнала магнитного поля от звезд. В настоящее время достаточно полные данные имеются для двух звезд ξ Boo A и 61 Cyg A, первая из которых характеризуется высоким, а вторая – низким уровнем активности. Однако если у первой звезды ξ Boo A (G8 V) хромосферная активность нерегулярна, то на 61 Cyg A (K5 V) отчетливо наблюдается цикл с периодом 7.3 года. Как различие уровней активности этих звезд, так и степень выраженности циклов обусловлено различием скоростей их осевого вращения: период вращения ξ Boo A составляет 6.3 суток, тогда как период вращения 61 Cyg A – 35.4 суток.

Регулярное изменение глобального магнитного поля с фазой осевого вращения наблюдается в некоторые эпохи, например, у звезды

ξ Boo A в 1998 (Плачинда и др. Астрон. журн., 2001, Т.78 С.550). Большинство наблюдаемых значений поля B меняются с фазой φ регулярно, хотя некоторые точки располагаются вне этой зависимости. Для обеих звезд соответствующие зависимости $B(\varphi)$ оказались практически подобными: абсолютные значения максимальных полей противоположных знаков различны, и интервалы фаз регистрации поля одного и того же знака не совпадают. Наблюдения 61 Cyg A день за днем дают указания на то, что появляющиеся отклонения сигнала от фазовой кривой исчезают в течение 1–2 суток.

Для звезды 61 Cyg A аппроксимация наблюдаемой зависимости $B(\varphi)$ полем центрального диполя в предположении малых отклонений его оси от оси вращения дает угол наклона $i = 33^\circ$ и напряженность магнитного поля на полюсах звезды $H = 60$. Однако обе указанные особенности фазовых кривых описываются моделью нецентрального диполя. Проведенная оценка показывает, что при сдвиге диполя на $0.15 R_*$ от центра звезды в направлении к полюсу форма теоретической кривой оказывается близка к наблюдаемой. Заметим, что наблюдения 61 Cyg A соответствуют сдвигу в сторону южного полюса, а у ξ Boo A – в сторону северного.

Отметим также, что те же авторы зарегистрировали глобальное магнитное поле у субгиганта G8 β Aql с напряженностями от -14 Гс до $+12.8$ Гс при среднеквадратичной ошибке 3–4 Гс. Однако зависимость значений $B(\varphi)$ для этой звезды, вращающейся с периодом 52 дня, пока не выявлена.

Глава II посвящена анализу мощных нестационарных процессов на активных поздних звездах. До сих пор считалось, по аналогии с импульсными вспышками, что развитие этих явлений связано с эволюцией локальных магнитных полей на звездах, в частности, оценка полного выделения энергии при вспышке состояла в вычислении изменения магнитной энергии в объеме области, где развивается первичный вспышечный процесс. Однако, проведенные внеатмосферные наблюдения длительных звездных вспышек показали, что такой подход неверен. В разделе II.2 собраны наблюдательные данные о мощных длительных рентгеновских вспышках, наблюдавшихся на субгигантах в двойных системах типа RS CVn и других активных звездах поздних спектральных классов (например, AB Dor). Во время этих нестационарных процессов обнаружено, что большое количество горячей плазмы с температурой свыше 100 млн К существует на протяжении многих часов. Впервые такие данные были получе-

ны на спутниках Ginga и ROSAT, основные наблюдения проводились на спутнике ВерроSAX, и в самое последнее время многочисленные длительные, но менее мощные явления регистрируются на спутнике CHANDRA.

В разделе II.3 проведено численное моделирование с целью выяснения основного процесса, приводящего к появлению мощного длительного рентгеновского излучения. При этом рассматривается только фаза спада вспышки – та газодинамическая стадия процесса, когда магнитное поле уже не оказывает заметного влияния на развивающийся процесс, кроме удержания плазмы внутри петли и обеспечения анизотропии процесса переноса тепла. Это согласуется с тем, что на рассматриваемых больших высотах в звездных коронах отношение газового давления к магнитному – плазменное $\beta = 8\pi p/B^2$ – начинает превосходить 1.

Расчет эволюции массы газа внутри гигантской корональной петли проводился путем решения системы одномерных газодинамических уравнений, учитывающих гравитацию, изменяющуюся с высотой, теплопроводность и потери на излучение. Радиационные потери, определяемые излучением основных резонансных линий высоко-температурных ионов, рассматривались как функция температуры и плотности в данной точке и вводились в уравнение энергии в виде одного из диссипативных членов. Считалось, что нагрев плазмы происходит близ вершины петли и распределен по времени и в пространстве (по массовой лагранжевой координате). Для этого моделирования программа, разработанная ранее для длительных солнечных вспышек, была модифицирована, что позволило проводить расчеты в условия различной силы тяжести и других характеристик звездных атмосфер. В частности, функция радиационных потерь была расширена по сравнению с солнечным случаем в область температур ≥ 20 МК согласно расчетам группы R.Mewe.

Моделирование проводилось для начальных плотностей в основании изотермической петли от $2 \cdot 10^{10}$ до $5 \cdot 10^{11} \text{ }^{-3}$, принятых величин половины длины петли $l = (0.5 - 5) \cdot 10^{10}$ см и тепловых потоков, изменяющихся в широких пределах. Гравитационное ускорение могло принимать значения $10^2 - 4 \cdot 10^4 \text{ }^{-2}$. В работе приведены результаты расчетов для трех поздних звезд: UX Ari (G5 V + K0 IV), HR 5110 = BH CVn (F2 IV + K2 IV) и для сравнения AB Dor – хорошо изученного молодого K1 карлика с возрастом всего 20–30 миллионов лет.

В результате проведенного моделирования выяснено, что после мак-

симула длительной рентгеновской вспышки действительно происходит эволюция образовавшейся фиксированной массы плазмы в гигантских корональных петлях. Этот процесс существует до тех пор, пока значительная энергия поступает в верхнюю часть гигантской петли или системы петель, и при этом теплопроводность является основным фактором, переносящим энергию вдоль петли.

Во всех вариантах моделирования ход температуры опережает изменение длины петли. Время максимального расширения петли практически совпадает с достижением наибольшей температуры, но затем температура падает, а заметное сжатие запаздывает. В самых больших вспышках на субгигантах практически не проявляется иногда наблюдаемое на Солнце резкое уменьшение размера петли после максимума нестационарных явлений (это так называемый shrinkage-эффект, см. Forbes T.G., Acton L.W. *Astrophys. J.* 1996. V.459. P.330). Отсутствие этой особенности процесса связано с очень большой интенсивностью нагрева в условиях малой силы тяжести.

Поведение температуры и меры эмиссии в ходе рассматриваемых вспышек удается хорошо описать, и это надежно определить параметры плазмы и размеры вспышечного источника. Для вспышки на звезде UX Ari, продолжавшейся около суток, через 5 часов после начала процесса размер петли возрастает в 3.5 раза, достигая $2 R_{\odot}$, плотность даже на очень больших высотах превосходит $7 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}$. Проведенное моделирование позволяет оценить площадь, занимаемую вспышками. Для двух мощных вспышек на UX Ari и AB Dor, сильно различающихся по длительности, площади рентгеновского источника оказались очень большими $S = (7 - 8) \cdot 10^{21} \text{ cm}^2$. Отсюда легко получить, что протяженность светящегося вещества вдоль нейтральной линии магнитного поля превосходит значение R_{\odot} , а учитывая "скважность" протяженность системы петель должна быть заметно больше. В зависимости от предположения о поперечном сечении петли, их общее количество во вспышечной системе оценивается от нескольких десятков до сотен.

Следует отметить, что представления о длительной рентгеновской вспышке как эволюции квазистационарных петель, хорошо согласуются с теорией таких образований, развитой в работе van den Oord G.H.J., Zuccarello F. (*Stellar Surface Structure*. /Eds. K.G.Strassmeier, J.L.Linsky. Dordrecht: Kluwer. 1996. P.433). С другой стороны существует много работ группы F.Reale, основанных на использовании одномерного Палермо-Гарвардского кода моделирования газодина-

мических процессов (например, Betta R.M. et al. *Astron.Astrophys. Suppl.* 1997. V.122. P.585 и цитируемая там литература). Этот подход был разработан первоначально для импульсных событий и затем автоматически применен к длительным явлениям. Существенным, но излишним элементом в нем является учет испарения вещества из хромосферы в корональную часть петли, что важно для импульсных событий, но не позволяет получить разумных результатов для длительных событий.

Энергия вспышек (до 10^{37} эрг) и масштабы явлений, уточненные в результате моделирования, противоречат принятому до сих пор утверждению о том, что анализируемые длительные рентгеновские вспышки являются результатом эволюции локальных магнитных полей. В разделе II.4 предлагается новый подход к оценке энергетики таких явлений. Если стационарная МГД-конфигурация возмущается, например, в результате движений плазмы в нижележащих слоях, то развивается система токов, энергия которых может реализоваться при вспышках. Для самых крупномасштабных МГД-конфигураций оценивается энергия магнитного поля, связанная с такими токами. При этом рассмотрены два случая: искажение дипольного поля всей звезды и искажение поля плоского магнитного диполя, располагающегося на некоторой глубине под фотосферой. Строгое решение для первого, трехмерного случая получено при использовании стационарного решения задачи о вытягивании наружу дипольного поля, заданного на сфере. Энергия искаженного поля диполя вне сферы оказалась равной

$$E = 2 \frac{m^2}{3 R^3} \left(1 - \frac{2 Re_m + 2}{(Re_m + 2)^2} \right) \approx 2 \frac{m^2}{3 R^3},$$

где m - магнитный момент диполя, Re_m - магнитное число Рейнольдса. Второе равенство для больших значений Re_m вне сферы радиуса R означает, что искажение поля вследствие истечения увеличивает магнитную энергию вне сферы вдвое по сравнению с этой первоначальной энергией диполя. Отметим, что для гелиосферы с токовым слоем аналогичная оценка иным методом была получена И.С.Веселовским (*Proc.9th European Meeting on Solar Physics, Magnetic Fields and Solar Processes. Florence, Italy. 1999. ESA SP-448. P.1217*). Для двумерного диполя удастся провести аналогичное рассмотрение.

Предполагая, что энергия крупномасштабного магнитного поля, связанная с токами, может реализовываться при вспышках и выра-

жая магнитный момент диполя через поле на полюсе, получаем $E = (1/3) B_{pole}^2 R^3$, или для случая плоского диполя $E = (9/8) B_y^2 \zeta^3$, где B_y - поле в вершине петли, ζ - протяженность системы петель вдоль нейтральной линии.

Для гигантских арочных систем комплексов активности на Солнце можно принять $\zeta = 10^{10}$ см (что равно $1/7 R_{\odot}$) и $B_y = 10$ Гс в вершине петель. Тогда приведенное выражение соответствует энергии $E \leq 10^{32}$ эрг, что согласуется с наблюдениями длительных солнечных вспышек. На некоторых активных поздних звездах значения поля в комплексах активности могут на порядок превосходить величины, характерные для солнечной короны, и оцениваемая величина ζ достигает 10^{11} см. Это естественно объясняет полную энергию длительных рентгеновских вспышек на субгигантах, которая может на 5 порядков превышать энергетику аналогичных солнечных явлений. В Главе III рассматривается вопрос о возможном влиянии крупномасштабных магнитных полей на темп истечения плазмы из корон активных поздних звезд, в основном, субгигантов в составе двойных систем типа RS CVn. Многочисленные радио- и внеатмосферные наблюдения двойных систем типа RS CVn, проведенные в последние годы, дали определенные указания на существование вокруг этих систем значительных количеств горячей плазмы. Некоторые из этих наблюдений позволяют составить представление о локализации и размерах источников соответствующего излучения.

Прежде всего, наблюдения изменений рентгеновских потоков во время затмений некоторых затменных систем RS CVn показывают, что часть этого излучения возникает в пространстве между звездами (Siarkowski M. in: *Stellar Surface Structure. Proc. of IAU Symp. No 176.* /Eds. K.G.Strassmeier, J.L.Linsky. 1996. Dordrecht: Kluwer. P.469). Интерферометрические радионаблюдения с большой базой позволили выделить не только системы гигантских петель, связанных с комплексами активности на одной или обеих звездах двойной системы, но также и протяженный источник, размеры которого сопоставимы с расстоянием между компонентами (см. Труды того же симпозиума, Kürster M. P.477; Lestrade J.-F. P.173). Однако, по разным причинам результаты этих наблюдений не позволяют в настоящее время надежно оценить потерю массы активными поздними звездами в этих двойных системах.

В то же время при анализе наблюдений линий Fe XVIII – Fe XXIII в крайней ультрафиолетовой и мягкой рентгеновской областях обнару-

жено, что распределение меры эмиссии от температуры имеет узкий максимум в области температур 4–9 МК. Впервые этот результат был получен для Капеллы – α Aur (F9 III + G6 III) (Dupree A.K. et al. *Astrophys. J.* 1993. V.418 P.L41) на спутнике EUV Explorer. В разделе III.2 предлагается интерпретировать появления такой спектральной особенности в Капелле в результате квазистационарного истечения из области короны более активного F9 гиганта. Это возможно в том случае, когда низкоскоростной звездный ветер, вероятно формирующийся в поясе стримеров активной компоненты, взаимодействует с короной и ветром спокойного G6 гиганта.

В работе проведено моделирование газодинамических процессов в области взаимодействия звездных ветров. Поскольку темп перетекания меняется с долготой в зависимости от условий в газовой оболочке звезды F9 (т.е. ветер активной звезды воздействует на корону спокойного гиганта ограниченное время), можно использовать постановку нестационарной задачи о распаде произвольного разрыва. Соответствующая система одномерных уравнений газодинамики с учетом гравитации и диссипативных процессов – теплопроводности и потерь на излучение – аналогична использованной в главе II при моделировании длительных рентгеновских вспышек. В результате получено, что для объяснения поведения меры эмиссии газа при температурах выше 4 МК, необходимо, чтобы ветер от горячей звезды был достаточно плотным: поток массы в области взаимодействия ветров должен достигать величины $\sim 2 \cdot 10^{-10} M_{\odot}$ в год. Очевидно, что потеря массы всей звездой может в несколько раз превышать это значение, так что данная оценка является нижним пределом для полной потери массы рассматриваемой звезды.

Недавно обсуждаемая спектральная особенность была обнаружена и изучена не только в случае Капеллы, но и у 24 других систем типа RS CVn (Sanz-Forcada J. et al. in: *Stellar Coronae in the Chandra and XMM-Newton Era. ASP Conf. Ser.* / Eds. Favata F., Drake J. 2002). Только у самых спокойных систем такая особенность отсутствует, тогда как у более активных высокотемпературная часть (6–9 МК) выражена сильнее по сравнению с низкотемпературной частью, впервые обнаруженной на Капелле. Наблюдения свидетельствуют о том, что плазма с температурой 6-9 МК удерживается в гигантских петлях в коронах этих звезд. Выяснилось также, что эта особенность мало чувствительна к мощным вспышкам, которые реально наблюдаются на рассматриваемых звездах.

В диссертации высказывается предположение, что в то время как низкотемпературная часть обсуждаемого максимума в распределении меры эмиссии связана с усиленным звездным ветром, его высокотемпературная часть обусловлена суммарным влиянием многочисленных слабых длительных вспышек. Скорее всего в коронах субгигантов происходят процессы, аналогичные динамическим вспышкам на Солнце, в которых велика роль постэруптивного выделения энергии. Эти процессы тесно связаны с крупномасштабными выбросами массы, и звезда теряет массу в течение всей динамической вспышки. Частота слабых длительных вспышек на некоторых из этих систем, например, на AR Lac уже известна из недавних внеатмосферных наблюдений. Это дает возможность оценить темп истечения, связанный с многочисленными нестационарными корональными процессами, и для активных систем типа RS CVn эта величина превышает $10^{-10} M_{\odot}$ в год.

Таким образом, потеря массы субгигантами в системах типа RS CVn как за счет плотного низкоскоростного звездного ветра, так и из-за многочисленных нестационарных процессов в короне должна на 3-4 порядка превосходить потерю массы Солнцем.

В Заключение кратко суммированы результаты диссертации и обсуждаются пути дальнейшего развития этого направления солнечно-звездной физики.

В Приложении приведены данные о некоторых активных поздних звездах, к которым относятся проблемы, рассмотренные в диссертации.

Научная новизна

В работе реализован конкретный подход к рассмотрению новой идеи о влиянии крупномасштабных магнитных полей на активные процессы, развивающиеся в различных слоях атмосфер звезд поздних спектральных классов. В частности, впервые:

- проведен специальный анализ наблюдений магнитного поля Солнца как звезды, который позволил дать интерпретацию первых наблюдений глобальных магнитных полей поздних звезд;
- разработана программа численного моделирования газодинамических процессов при длительных звездных вспышках на новых представлениях о фазе спада таких вспышек как эволюции гигантской корональной петли, заполненной фиксированной массой газа;
- обоснован новый метод оценки энергии длительных вспышек, осно-

ванный на преобразовании энергии не локальных, а крупномасштабных магнитных полей в излучение и кинетическую энергию частиц; – устанавливается связь между новой спектральной особенностью, наблюдаемой в коротковолновом и рентгеновском диапазонах у активных двойных систем, и темпом истечения корональной плазмы.

Результаты, выносимые на защиту

Явления типа солнечной активности широко распространены среди звезд. На Солнце эти явления связаны, в основном, с эволюцией локальных полей. Крупномасштабные магнитные поля, сравнимые по своим масштабам с солнечным радиусом, определяют формирование корональных дыр и стримеров, и, соответственно, высоко- и низкоскоростного солнечного ветра. Кроме того, они оказывают определенное влияние на развитие длительных нестационарных процессов – СМЕ и вспышек – в солнечной короне. Однако на Солнце такое влияние крупномасштабного поля на активность выражено не сильно. На основе результатов современных внеатмосферных наблюдений активных поздних звезд на спутниках EUVE, ВерроSAX и CHANDRA в диссертации развивается идея о том, что не только локальные, но и крупномасштабные магнитные поля играют заметную роль в формировании активности на некоторых звездах поздних спектральных классов.

На защиту выносятся следующие результаты:

1 - анализ общего магнитного поля Солнца (ОМПС) на протяжении нескольких циклов, и обоснование того, что вращательная модуляция аналогичного сигнала от звезды может служить хорошей характеристикой для описания крупномасштабных магнитных полей активных поздних звезд;

2 - численное моделирование длительных рентгеновских вспышек на поздних субгигантах, которое продемонстрировало, что такие явления существуют до тех пор, пока значительная энергия поступает в верхнюю часть системы гигантских петель, и позволило надежно определить физические условия в плазме и размеры источника мягкого рентгеновского излучения;

- новый метод оценки энергии мощных нестационарных процессов на активных поздних звездах, основанный на определении изменения составляющей крупномасштабного магнитного поля, связанной с токами;

3 - оценка потери массы активными компонентами двойных систем

типа RS CVn, основанная на интерпретации данных об избытке излучения в линиях ионов Fe XVIII – Fe XXIII в крайнем ультрафиолетовом и мягком рентгеновском диапазонах и решении задачи о столкновении звездных ветров; при этом темп квазистационарного и нестационарного истечения оказывается на 3–4 порядка больше потери массы Солнцем и может достигать $10^{-10} M_{\odot}$ в год.

Личный вклад автора

Во всех работах автор принимал участие в формулировке задач, проведении газодинамических и статистических расчетов и анализе полученных результатов. Относительно работ, выполненных в соавторстве, следует отметить, что первый вариант программы численного моделирования газодинамических процессов при длительных солнечных вспышках разработан автором совместно с К.В.Гетманом, дальнейшее развитие и использование этого подхода для расчетов процессов на звездах произведены автором самостоятельно. При разработке метода оценки энергии длительных звездных вспышек автором проведены основные вычисления.

Научное и практическое значение

Полученные в диссертации результаты продемонстрировали плодотворность новой идеи о влиянии крупномасштабного магнитного поля на активность поздних звезд. Стало ясно, что имеется еще несколько интересных аспектов этой проблемы, дальнейшая разработка которых представляет интерес: в частности, связь крупномасштабного поля с активными долготами, дальнейшее развитие динамо-теории применительно к звездам повышенной светимости, анализ наблюдений активных поздних звезд в радиодиапазоне с целью изучения их магнитосфер и общих оболочек двойных систем типа RS CVn.

Использованный в работе подход позволяет с более общих позиций анализировать физические процессы, развивающиеся на Солнце. Например, физика солнечных вспышек становится более ясной, если рассматривать их общие свойства среди совокупности всех возможных явлений, которые наблюдаются на активных поздних звездах и характеризуются полным энерговыделением $10^{27} - 10^{37}$ эрг.

Апробация

Результаты диссертации докладывались на 13-й школе-семинаре "Физика Солнца и космическая электродинамика посвященной памяти Е.А.Макаровой (Москва, ГАИШ, декабрь 1996 г.); на семинаре отдела звездной астрофизики (Москва, ГАИШ, декабрь 1997 г.); на международной конференции "Крупномасштабная структура солнечной активности"(Санкт-Петербург, ГАО РАН, июнь 1999 г.); на международной конференции JENAM-2000, Symposium S07: "Solar Cycle: Sun at the Top of Maximum"(Москва, МГУ, июнь 2000 г.); на отчетной молодежной конференции по программе "Интеграция"(Москва, АКЦ ФИАН, ноябрь 2000 г.); на научных семинарах ИЗМИРАН (Троицк, ИЗМИРАН, ноябрь 1999 г. и февраль 2002 г.); на международной конференции 35th ESLAB Symposium "Stellar Coronae in the Chandra and XMM-Newton era"(Нидерланды, Нордвайк, июнь 2001 г.); на семинаре астрофизических отделов ГАО РАН (Санкт-Петербург, ГАО РАН, февраль 2002 г.)

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Гетман К.В., Лившиц И.М. "Распространение ударных волн в коронах Солнца и других поздних звезд"// Известия РАН, серия физическая. 1998. Т.62. No 6. С.1255–1257
2. Гетман К.В., Лившиц И.М. "Взаимодействие звездных ветров в двойной системе Капелла"// Вестник МГУ. Серия 3. Физика. Астрономия. 1999. No 1. С.59–62
3. Лившиц И.М. "Крупномасштабная активность на компонентах двойных систем типа RS Гончих Псов"// Труды конф. "Крупномасштабная структура солнечной активности". Санкт-Петербург, ГАО РАН. 1999. С.139–144
4. Лившиц И.М. "Вращательная модуляция общего магнитного поля Солнца"// Труды конф. "Солнце в период смены знака полярностей магнитного поля". Санкт-Петербург, ГАО РАН. 2001. С.241–244
5. Livshits I.M. "Modelling long duration X-ray flares on the UX Ari late-type subgiant"// Astronomical and Astrophysical Transactions. 2001. V.20. P.587–594
6. Лившиц И.М., Лившиц М.А. "Происхождение длительных рентгеновских вспышек на активных поздних звездах" // Астрономический журнал. 2002. Т.79. N 4. С.364–376
7. Livshits I.M., Livshits M.A. "On the Origin of Large X-ray Flares on

RS CVn Subgiants". The 35th ESLAB Symposium "Stellar Coronae in the Chandra and XMM-Newton era" Noordwijk, The Netherlands. 25-29 June 2001. Abstract Book. P.69;
// In: "Stellar Coronae in the Chandra and XMM-Newton era"
/ Eds. F.Favata, J.Drake. ASP Conf.Ser. 2002 (in press)