

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Низамов Булат Аликович

**Нестационарные процессы на маломассивных звёздах
различного возраста**

Специальность 01.03.02 —
«Астрофизика и звёздная астрономия»

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Москва — 2019

Работа выполнена на кафедре астрофизики и звёздной астрономии физического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук
Кацова Мария Михайловна

Официальные оппоненты: **Гринин Владимир Павлович**,
доктор физико-математических наук,
профессор,
ГАО РАН, лаборатория звездообразования,
заведующий

Обридко Владимир Нухимович,
доктор физико-математических наук,
профессор,
ИЗМИРАН, отдел физики Солнца и
солнечно-земных связей,
главный научный сотрудник

Саванов Игорь Спартакович,
доктор физико-математических наук,
ИНАСАН, отдел экспериментальной астрономии,
ведущий научный сотрудник

Защита диссертации состоится «12» декабря 2019 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета МГУ.01.02 Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова по адресу: Москва, Университетский проспект, 13.

Email: nizamov@physics.msu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В.Ломоносова (Ломоносовский просп., д.27) и на сайте ИАС «ИСТИНА»: <http://istina.msu.ru/dissertations/243410588/>.

Автореферат разослан «5» ноября 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
МГУ.01.02,
кандидат физ.-мат. наук

Пружинская Мария Викторовна

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования

Данная работа посвящена активности и нестационарным процессам, характерным для самого многочисленного населения Галактики — поздних звёзд главной последовательности. Звёзды спектральных классов G, K, M различного возраста, включая Солнце, являются объектом этого исследования. Прежде всего необходимо уточнить, что имеется в виду активность солнечного типа, т.е. магнитная активность, характеризующаяся возникновением пятен, активных областей и вспышек, а также формированием циклов активности. Кроме того, следует сделать замечание методологического характера. Как указывал Хайш [1], до конца 90-х годов XX века сообщества исследователей солнечных и звёздных вспышек были весьма изолированы друг от друга, что легко понять, учитывая особенности наблюдения этих объектов. Однако представляется вполне естественным, что исследования в обоих этих направлениях должны дополнять друг друга: с одной стороны, на Солнце мы имеем наблюдения с высоким пространственным разрешением, чувствительностью, спектральным и временным покрытием; с другой стороны, вспыхивающие звёзды весьма разнообразны, и на них развитие вспышечных процессов должно иметь свои особенности. Различные проявления звёздной активности, главным образом вспышки, и являются предметом данного исследования.

Актуальность исследования различных проявлений звёздной активности связана с несколькими причинами. Во-первых, в последние десять-двадцать лет накоплено много наблюдательного материала в разных диапазонах спектра о большом числе звёзд на разных эволюционных стадиях. Например, измерены периоды вращения и рентгеновская светимость для нескольких сотен звёзд в молодых звёздных скоплениях [2]. В рамках проекта «Vsool» измерены средние магнитные поля на 67 звёздах солнечного типа [3]. Заново проанализированы данные об индексе активности R'_{HK} [4]. На космическом телескопе Kepler получены данные о запятнённости десятков тысяч звёзд [5], обнаружены тысячи вспышек на звёздах поздних спектральных классов главной последовательности и ветви субгигантов [6]. Всё это позволяет, с одной стороны, искать и количественно исследовать более тонкие эффекты в уже известных закономерностях, а с другой стороны, сравнивать между собой различные проявления активности, что и делается в диссертации.

Во-вторых, изучение вспышечной активности ближайшей к нам звезды — Солнца — в последнее время приобретает практическое значение, поскольку эта активность является важным фактором космической погоды.

В-третьих, активность звёзд аналогичным образом оказывает существенное воздействие на атмосферы планет, которые обращаются вокруг

них. После открытия нескольких тысяч экзопланет (во многом благодаря космическому телескопу Kepler), среди которых есть и планеты, похожие на Землю, началось всестороннее исследование физических условий на этих планетах. Ясно, что близость звезды, на которой часто случаются мощные вспышки или которая обладает повышенным рентгеновским или ультрафиолетовым излучением, может критическим образом влиять на эти условия, в том числе на возможность существования жизни на планете. В этой связи можно упомянуть недавнее открытие планеты около звезды Проксима Центавра [7], которая, как известно, является вспыхивающим М-карликом [8].

Наконец, в настоящее время нельзя считать решённым вопрос о том, одинакова ли природа солнечных и звёздных вспышек. С одной стороны, есть немало указаний на то, что это так. Например, энергетический спектр вспышек на Солнце и звёздах подчиняется степенному закону [9]; в звёздных вспышках наблюдался эффект Нойперта [10, 11, 12, 13, 14], а также квазипериодические пульсации, которые также наблюдаются и в солнечных вспышках [15, 16, 17]. Имеются наблюдения, указывающие на выброс коронального вещества в звёздной вспышке [18, 19, 20]. С другой стороны, огромная энергия наиболее мощных супервспышек, наблюдавшихся на Kepler, ставит под сомнение возможность развития этих явлений по «солнечному» сценарию [21]. Для понимания механизма вспышек в целом важно выяснить, каким образом формируется их излучение, и этот вопрос применительно к супервспышкам на солнцеподобных звёздах практически не исследован.

Степень разработанности темы исследования

Зависимость рентгеновской светимости звёзд главной последовательности от скорости их вращения была найдена в работе Паллавичини и др. [22]: они установили, что рентгеновская светимость поздних звёзд пропорциональна квадрату скорости вращения (см. также [23]). В ряде последующих работ, например [24, 25, 26], было отмечено, что эта зависимость не является универсальной и нарушается для самых быстро вращающихся звёзд, причём впервые это было обнаружено для двойных звёзд типа RS CVn. Первая большая выборка одиночных звёзд (259 объектов), среди которых были звёзды как с быстрым, так и с медленным вращением, была проанализирована Пиццолато и др. [27], которые подтвердили существование двух режимов активности у поздних карликов. Позднее число звёзд в выборке было доведено до 824 в работе Райта и др. [2]. Нойес и др. [28] обратили внимание, что удобным параметром, характеризующим активность, является число Россби, которое определяется как отношение периода вращения звезды ко времени конвективного перемешивания. Однако число Россби модельно зависимо и не определяется из наблюдений. Райнерс и др. [29] показали, что рентгеновскую активность можно лучше параметризовать, используя вместо числа Россби

комбинацию из периода вращения и радиуса звезды. Взаимосвязь между вращением и активностью звёзд была прослежена и по другим индикаторам активности [30]: по эмиссии в линиях H и K Ca II [28], в линии H α [31], по среднему по звезде магнитному полю [32]. Дэвенпорт [6] указывает на существование этой связи, в частности насыщения активности, по результатам наблюдений вспышек на телескопе Kepler. Нотсу и др. [33] обнаруживают эту связь для общей площади активных областей на звезде, также по данным Kepler.

Важнейшим проявлением звёздной активности являются вспышки. В силу очевидных причин гораздо лучше изучены вспышки на Солнце. В частности, построена так называемая стандартная модель солнечных вспышек [34, 35, 36, 37], которая успешно объясняет многие, хотя и не все, наблюдения этих событий. Звёздные вспышки не могут наблюдаться с таким пространственным и временным разрешением, как солнечные, поэтому модели этих вспышек с самого начала было труднее ограничивать наблюдениями. Многообразие наблюдательных свойств этих событий подробно описано в монографии [9]. Обычно для их интерпретации применяют модели, качественно схожие с моделями солнечных вспышек, например, [38, 39, 40]. Одним из вопросов моделирования солнечных и звёздных вспышек является происхождение оптического континуума. Существующие модели, описывающие формирование этого излучения, можно разделить на два типа. К первому относятся модели, в которых задаётся некий механизм нагрева атмосферы, и в соответствии с ним рассчитывается *статическая* модель «прогретой» атмосферы. Гринин и Соболев построили ряд моделей, в которых атмосфера красного карлика прогревается потоком нетепловых протонов или электронов [41, 42, 43], [44]. Абударам и Эну [45] рассчитали воздействие нетепловых электронов на солнечную хромосферу и получили, что её разогрев порождает излучение, которое, в свою очередь поглощается в фотосфере, которая также нагревается и излучает в континууме. Холи и Фишер [46] рассчитали обогрев атмосферы красного карлика мягким рентгеновским излучением и тоже получили эмиссию в континууме.

Ко второму типу относятся газодинамические модели. Первая из них описана в работе Костюк и Пикельнера [47], где они впервые показали важность учёта газодинамических процессов в развитии вспышек. Впоследствии появилось множество работ в этом направлении, например, [48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55]. Лившиц и др. [48] впервые показали, что оптический континуум звёздных вспышек может объясняться излучением так называемой низкотемпературной конденсации, которая образуется между ударной волной и тепловым фронтом и движется в сторону фотосферы. Что касается оптического континуума солнечных вспышек, то в аналогичных газодинамических моделях конденсация не излучает в континууме,

хотя возможен вторичный обогрев, как в работе [45]. Недавние наблюдения на аппаратах RHESSI и SDO [56, 57], по-видимому, показывают, что он возникает в результате прямого нагрева хромосферы нетепловыми электронами.¹ Однако, в работе [58], также основанной на наблюдениях RHESSI и SDO, делается вывод, что энергии нетепловых электронов не хватает, чтобы обеспечить свечение в оптическом континууме.

Огромный вклад в изучение звёздных вспышек внесли наблюдения на космическом телескопе Kepler. Благодаря его высокой фотометрической точности и непрерывным наблюдениям в течение четырёх лет удалось зафиксировать тысячи вспышек на звёздах, так что их стало возможным изучать статистическими методами [6, 59, 60]. Самым неожиданным стало открытие супервспышек на солнцеподобных звёздах [61]. В результате изучения этих звёзд выяснилось, что это молодые быстро вращающиеся объекты, которые обладают горячими коронами, сильно излучающими в мягком рентгене. И всё же фундаментальные параметры этих звёзд близки к солнечным, поэтому неясно, как в этих вспышках может генерироваться столь мощный оптический континуум (оценки энергии супервспышек доходят до 10^{36} эрг). Вспышки эти происходят достаточно редко: даже на самой часто вспыхивающей звезде примерно раз в десять суток. Для этих вспышек нет ни спектральных, ни даже фотометрических наблюдений. Существующие модели вспышек для них, вероятно, не вполне применимы, поскольку короны этих звёзд, по-видимому, намного плотнее и горячее, чем у Солнца. Мало того, неясно, может ли магнитное поле таких звёзд обеспечить необходимую энергию. В работе [62] даны значения среднего магнитного поля для нескольких очень молодых звёзд типа Солнца. Если считать, что это среднее значение имеет место во всей короне, то получится, что энергия наиболее мощных супервспышек близка к полной энергии магнитного поля в короне. Таким образом, указанные наблюдения молодых G-звёзд ставят новые вопросы перед исследователями звёздной активности.

Методология исследования

В работе использованы методы и подходы различной степени сложности, хорошо зарекомендовавшие себя в многочисленных исследованиях: это классический метод наименьших квадратов для поиска параметрической зависимости рентгеновской активности от параметров звёзд, а также для построения жёстких рентгеновских спектров солнечных вспышек; метод прямого моделирования в программном пакете Solar Software для анализа наблюдений на космическом телескопе RHESSI; при моделировании прогрева звёздной фотосферы мягким рентгеновским излучением использован подход теории звёздных атмосфер, где решается система уравнений,

¹Отметим, что авторы указанных работ расходятся относительно того, на какой глубине в атмосфере возникает это излучение.

каждое из которых соответствует одному из искомым параметров модели: интенсивности излучения, температуре и т.д.

Цели и задачи работы

Целью работы является выявить, на каких звёздах бывают супервспышки, есть ли связь между вспышечной активностью и другими видами активности; выяснить свойства самых мощных солнечных вспышек, могут ли они по энергии приближаться к звёздным супервспышкам; предложить механизм формирования оптического континуума в звёздных супервспышках.

Научная новизна

В работе выявляется зависимость корональной активности поздних звёзд главной последовательности от периода вращения. Подобный анализ для звёзд спектральных классов G, K, M в отдельности делается впервые; ранее уже было известно, что для звёзд этих спектральных классов характерны два типа активности: режим насыщения и режим активности солнечного типа, причём переход от одного режима к другому происходит на определённом этапе эволюции звезды, то есть при определённом периоде осевого вращения. Новым является тот результат, что период вращения, при котором происходит смена типа активности, зависит от спектрального класса звезды: этот период тем больше, чем позднее спектральный класс.

Новым является каталог рентгеновских вспышек на Солнце, зарегистрированных аппаратом Mars Odyssey/HEND, эти данные ранее не публиковались. Для 60 вспышек даны кривые блеска и спектры в диапазоне 85-1014 кэВ. Кроме того, проверена более старая калибровка прибора HEND, которая использовалась ранее в работах по отдельным событиям; показано, что старая калибровка адекватна задачам, решаемым в этих статьях.

Оценена энергия нетепловых электронов в солнечной вспышке 28 октября 2003г., одной из самых мощных за всю историю наблюдений. Это сделано также с помощью прибора HEND. Прежняя оценка была сделана по данным телескопа RHESSI, который наблюдал вспышку лишь частично. HEND наблюдал вспышку целиком, и оценка энергии по его данным составляет 2.3×10^{32} эрг.

Предложен механизм, ответственный за генерацию оптического континуума в супервспышках на солнцеподобных звёздах. Этим механизмом служит обогрев фотосферы звезды мягким рентгеновским излучением, которое испускается горячей плазмой, заполняющей вспышечную петлю. Проведённые расчёты показывают, что если эта обогреваемая часть фотосферы занимает 10% видимого диска звезды, то контраст в оптическом континууме может достигать 0.8%.

Теоретическая и практическая значимость

Результаты, полученные в первой главе, имеют важное значение в контексте гирохронологии — определения возраста звёзд по скорости их

осевого вращения. Этот метод основан, в частности, на зависимости активности звезды от скорости (или периода) её осевого вращения. Однако эта зависимость существует лишь для достаточно медленно вращающихся звёзд, т.е. лишь начиная с некоторого периода вращения, который, как показано в данной работе, зависит от спектрального класса звезды. Мы, таким образом, находим, для звёзд с каким периодом вращения метод гирохронологии применим, а для каких нет.

Данные, приведённые в каталоге рентгеновских вспышек, могут быть использованы для «стереоскопического» изучения вспышек, а именно для исследования направленности их жёсткого рентгеновского излучения. Этот вопрос важен для понимания природы ускорения частиц во вспышках.

В третьей главе дана оценка энергии одной из сильнейших солнечных вспышек. Знание максимальной энергии, которая может высвободиться в солнечных вспышках, ценно в контексте солнечно-звёздных связей, поскольку указывает, насколько отличаются по энергии солнечные вспышки от звёздных. Это также имеет значение с точки зрения космической погоды, потому что именно сильные вспышки оказывают самое заметное воздействие на Землю.

Излучение в непрерывном континууме, которое наблюдается в звёздных супервспышках, является яркой чертой, которая отличает эти события от солнечных вспышек. До сих пор формированию этого излучения уделяется мало внимания, хотя его понимание может дать ценную информацию как о параметрах плазмы и магнитного поля, которые имеют место в супервспышках, так и о механизме самих супервспышек.

Положения, выносимые на защиту:

1. У звёзд поздних спектральных классов главной последовательности период осевого вращения, при котором происходит смена режимов корональной активности, зависит от спектрального класса: чем позднее класс, тем больше этот период.
2. Звёзды с наиболее мощными супервспышками с полной энергией свыше 10^{35} эрг — это преимущественно молодые быстро вращающиеся звёзды, либо субгиганты, либо компоненты двойных систем.
3. Результаты анализа наблюдений солнечных вспышек в жёстком рентгеновском диапазоне на детекторе HEND на борту космического аппарата Mars Odyssey с использованием кросс-калибровки по наблюдениям RHESSI, согласуются с результатами, получаемыми с независимой калибровкой детектора методом компьютерного моделирования.
4. Полная энергия нетепловых электронов, ускоренных в гигантской солнечной вспышке 28 октября 2003 г., достигала не менее 2.3×10^{32} эрг.

5. Мягкое рентгеновское излучение горячей вспышечной плазмы с мерой эмиссии $\sim 10^{55} \text{ см}^{-3}$ при температуре 20 МК во время супервспышек на солнцеподобных звёздах может вызывать усиление блеска звезды в оптическом континууме до 0.8%.

Степень достоверности и апробация результатов

Достоверность результатов, полученных в диссертации, обусловлена применением хорошо зарекомендовавших себя и многократно проверенных математических методов, а также сравнением с результатами, опубликованными другими авторами.

Результаты диссертации были доложены на следующих конференциях.

- Новая оценка энергии нетепловых электронов в гигантской солнечной вспышке 28 октября 2003 г. по наблюдениям Mars Odyssey. **Низамов Б.А.**. XXII Всероссийская ежегодная конференция «Солнечная и солнечно-земная физика – 2018», ГАО РАН, Санкт-Петербург, Россия, 8-12 октября 2018.
- Каталог жёстких рентгеновских вспышек на Солнце, зарегистрированных с околomarсианской орбиты Mars Odyssey/HEND в 2001–2016 гг. Лившиц М.А., Зимовец И.В., Головин Д.В., **Низамов Б.А.**, Выборнов В.И., Митрофанов И.Г., Козырев А.С., Литвак М.Л., Санин А.Б., Третьяков В.И.. Тринадцатая ежегодная конференция «Физика плазмы в солнечной системе», 12–16 февраля 2018 г., ИКИ РАН, Москва.
- Особенности звёзд, где «Кеплер» зарегистрировал супервспышки. Кацова М.М., **Низамов Б.А.**. 37-й Междисциплинарный семинар АстрО, Москва, ГАИШ МГУ, Россия, 14 ноября 2017.
- Особенности звёзд, где зарегистрированы супервспышки. Кацова М.М., **Низамов Б.А.**. XXI Всероссийская ежегодная конференция Солнечная и солнечно-земная физика – 2017, ГАО РАН, Санкт-Петербург, Россия, 9-13 октября 2017.
- Активность самого раннего Солнца. Кацова М.М., Лившиц М.А., Мишенина Т.В., **Низамов Б.А.**. Земля на ранних этапах развития Солнечной системы, Москва, ГАИШ МГУ, Россия, 28-30 ноября 2016.
- Короны G-, K- и M-звезд и условия возникновения супервспышек. **Низамов Б.А.**, Кацова М.М., Лившиц М.А.. XX Всероссийская ежегодная конференция «Солнечная и солнечно-земная физика – 2016», ГАО РАН, Санкт-Петербург, Россия, 10-14 октября 2016.
- Superflare G and K Stars and the Lithium abundance. Katsova M.M., Livshits M.A., Mishenina T.V., **Nizamov B.A.**. The 19th Cambridge Workshop on Cool Stars, Stellar Systems, and the Sun, Uppsala, Швеция, 6-11 июня 2016.

- Optical Continuum of Powerful Solar and Stellar Flares. **Низамов Б.А.**, Лившиц М.А.. Radiation mechanisms of astrophysical objects: classics today, S-Petersburg, Россия, 21-25 сентября 2015.
- Components of optical continuum in solar and stellar flares. **Низамов Б.А.**, Лившиц М.А.. Superflares and Activity of the Sun in the Cycle Formation Epoch, Kazrin, Tel Aviv, Израиль, 28 апреля – 1 мая 2015.

Личный вклад автора

Проведён математический анализ данных о рентгеновской светимости и периодах вращения выборки звёзд, получены параметры зависимости, связывающей эти свойства звёзд. Сопоставлены периоды вращения и уровень переменности звёзд с супервспышками по отношению к обширной выборке звёзд, наблюдавшихся на КА Kepler.

Проведена полная обработка данных о рентгеновских вспышках на Солнце, наблюдавшихся аппаратом Mars Odyssey/HEND, построены кривые блеска и спектры для 60 событий, построена сводная таблица, объединяющая как данные этих наблюдений, так и некоторые литературные данные.

Создано программное обеспечение для обработки данных HEND, с помощью которого оценена энергия нетепловых электронов в солнечной вспышке 28 октября 2003г. Также проведён необходимый анализ наблюдений этой вспышки на космическом телескопе RHESSI.

Написан программный код для совместного решения уравнений переноса излучения, статистического равновесия, электронейтральности и лучистого равновесия. Этот код применён для расчёта структуры атмосферы звезды, обогреваемой извне мягким рентгеновским излучением горячей вспышечной плазмы. Спектр мягкого рентгеновского излучения рассчитан с помощью пакета CHIANTI в составе Solar Software.

Публикации

Результаты диссертации опубликованы в 9 научных работах, в том числе

- в 5 статьях в научных изданиях из списка Web of Science, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности
 1. Изменение характера активности корон маломассивных звезд различных спектральных классов. **Низамов Б.А.**, Кацова М.М., Лившиц М.А. Письма в Астрономический журнал, 2017, Т. 43, № 3, С. 230–238. (импакт-фактор 1.075)
 2. Каталог жёстких рентгеновских вспышек на Солнце, зарегистрированных с околomarсианской орбиты Mars Odyssey/HEND в 2001–2016 гг. Лившиц М.А., Зимовец И.В., Головин Д.В., **Низамов Б.А.**, Выборнов В.И.,

- Митрофанов И.Г., Козырев А.С., Литвак М.Л., Санин А.Б., Третьяков В.И. *Астрономический журнал*, 2017, Т. 94, № 9, С. 778–792. (импакт-фактор 1.235)
3. New estimation of non-thermal electron energetics in the giant solar flare on 28 October 2003 based on Mars Odyssey observations. **Nizamov B.A.**, Zimovets I.V., Golovin D.V., Sanin A.B., Litvak M.L., Tretyakov V.I., Mitrofanov I.G., Kozyrev A.S. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2018, **179**, 484–493. (импакт-фактор 1.79)
 4. Properties of Kepler Stars with the Most Powerful Flares. Katsova M.M., **Nizamov B.A.** *Geomagnetism and Aeronomy*, 2018, **58**, 899. (импакт-фактор 0.669)
 5. Soft X-ray heating as a mechanism of optical continuum generation in solar-type star superflares. **Nizamov B.A.** *MNRAS*, 2019, **489**, 4338. (импакт-фактор 5.231)
- в 4 сборниках трудов конференций
1. Optical Continuum of Powerful Solar and Stellar Flares. **Nizamov B.A.**, Livshits M.A. Radiation mechanisms of astrophysical objects: classics today. Proceedings of the conference in honor of the 100th birthday of Academician Victor V. Sobolev held at St. Petersburg on September 21-25, 2015, 223–228.
 2. Активность самого раннего Солнца. Кацова М.М., Лившиц М.А., Мишенина Т.В., **Низамов Б.А.** *Жизнь и Вселенная*. 2017, ВВМ, Санкт-Петербург, 63–73.
 3. Особенности звёзд, где «Kepler» зарегистрировал супервспышки. Кацова М.М., **Низамов Б.А.** Труды XXI Всероссийской конференции «Солнечная и солнечно-земная физика – 2017», ГАО РАН Санкт-Петербург, 2017, 173–178.
 4. Superflare G and K Stars and the Lithium abundance. Katsova M.M., Livshits M.A., Mishenina T.V., **Nizamov B.A.** Proceedings of the 19th Cambridge Workshop on Cool Stars, Stellar Systems, and the Sun, Zenodo Sweden, Uppsala, 2016, id.124, 1–6.

Содержание работы

Работа состоит из введения, четырёх глав и заключения. Всего в работе содержится 6 таблиц и 32 рисунка. Общий объём 134 страниц, список литературы содержит 190 наименований.

Во **введении** даётся обзор литературы по теме работы, обсуждается актуальность работы, её цели, научная новизна, применимость результатов в других исследованиях.

В главе 1 анализируется эволюция корональной активности маломассивных звёзд поздних спектральных классов. Это исследование основано на работах Райта и др. [2] и Райнерса и др. [29]. В первой из них представлены данные по рентгеновской светимости и периодам осевого вращения для 824 звёзд поздних спектральных классов и показано, что существуют два режима активности поздних звёзд: режим насыщения активности, когда рентгеновская светимость не зависит от периода осевого вращения, и режим активности солнечного типа, когда рентгеновская светимость убывает по мере замедления вращения. Во второй работе показано, что уровень рентгеновской активности лучше описывается не одним параметром — периодом вращения, а комбинацией из периода и радиуса звезды. В обеих этих работах поздние звёзды изучались как единая группа, без разделения по спектральным классам. Мы проделали анализ данных аналогично Райнерсу и др., но по отдельности для звёзд классов G, K, M и обнаружили, что период вращения, при котором режим насыщения активности сменяется режимом активности солнечного типа, зависит от спектрального класса звезды: если для звезды класса G2 этот переход происходит на периоде 1.1 суток, то для звезды класса M3 — только на периоде 7.2 суток. Другими словами, по мере замедления вращения звезды с возрастом более поздние (т.е. более холодные и компактные) звёзды дольше остаются в режиме насыщения активности. Это хорошо иллюстрируется распределением звёзд разных классов по типам активности: среди M-звёзд выборки преобладают звёзды с насыщением активности; среди G-звёзд напротив почти нет звёзд с насыщением активности; в свою очередь, K-звёзды разделились по обоим типам активности приблизительно поровну.

Мы также анализируем расположение звёзд с супервспышками на диаграмме период вращения – амплитуда вращательной модуляции относительно большой выборки звёзд из работы [63] и находим, что звёзды с супервспышками — это, в основном, звёзды с малым периодом вращения (несколько суток) и большой амплитудой вращательной модуляции, т.е. с большой оптической переменностью. Это говорит о высокой запятнённости фотосфер таких звёзд и, по-видимому, высоком уровне корональной активности.

Глава 2 посвящена каталогу жёстких рентгеновских вспышек, зарегистрированных прибором Mars Odyssey/HEND за 2001–2016 годы. Описана процедура калибровки прибора и дана оценка её качества. Также описан метод поиска вспышек в данных прибора и метод обработки этих данных. Приведён окончательный каталог вспышек, содержащий 60 событий. Смысл этой главы во многом состоит в том, чтобы проверить, насколько справедливы результаты предыдущих работ, сделанных по тем же данным HEND, но с более грубой калибровкой детектора. Сравнение спектров вспышек, вошедших в каталог, полученных с новой и старой

калибровкой прибора, показало, что старая, более грубая калибровка адекватна задачам, решавшимся в более ранних работах. Другим выводом является подтверждение того, что прибор HEND можно использовать для анализа жёстких рентгеновских вспышек на Солнце, а его показания для не слишком мощных событий близки к измерениям космического телескопа RHESSI.

В главе 3 анализируется жёсткое рентгеновское излучение солнечной вспышки 28 октября 2003 г., измеренное также детектором HEND на борту Mars Odyssey. Эта вспышка — самая мощная в каталоге, описанном в предыдущей главе. Прежде всего следует сказать, что наблюдения солнечных вспышек в жёстком рентгеновском диапазоне дают ценную информацию о потоке и, соответственно, полной энергии нетепловых электронов, ускоренных во вспышке. Такую информацию можно извлечь, привлекая так называемую модель толстой мишени [64, 65].

Нетепловые частицы являются важным каналом, в который переходит энергия непотенциального магнитного поля в активной области. Энергия этой вспышки в аналогичном диапазоне была ранее измерена телескопом RHESSI, но этот инструмент наблюдал не всю вспышку, пропустив её импульсную фазу, поэтому вопрос о полной энергии нетепловых электронов в этом событии был открыт. Мы измерили эту энергию, используя данные как HEND, так и RHESSI. Оба инструмента наблюдали вспышку с близких позиционных углов, поэтому их измерения с учётом разности расстояний Солнце–Земля и Солнце–Марс должны быть идентичны. Мы обнаружили однако, что это не совсем так: из-за эффекта pile-up детектор HEND переходит в насыщение. Мы исправили это искажение с помощью измерений RHESSI (за то время, когда эти наблюдения велись), после чего смогли оценить энергию электронов уже за всё время вспышки по данным HEND. Мы получили нижнюю оценку полной энергии нетепловых электронов во вспышке 2.3×10^{32} эрг при пороговой энергии 43 кэВ. Это очень большая величина, хотя она, по-видимому, не противоречит теоретическим пределам. Сравнивая наши результаты с результатами других исследований, мы можем сказать, что энергия нетепловых электронов свыше 4×10^{33} кэВ, которую нашли Кэйн и др. [66] для вспышки 4 ноября 2003 г., вероятнее всего завышена из-за того, что они приняли произвольный порог энергии электронов в 20 кэВ, тогда как он может достигать (как в случае события 28 октября) до более чем 40 кэВ. Из наших результатов следует, что в наблюдениях 28 октября на RHESSI «пропущено» около 40% полной нетепловой энергии вспышки.

Глава 4 посвящена изучению оптического континуума в супервспышках на солнцеподобных звёздах. Высказывается гипотеза о том, что усиление этого континуума на величину порядка 1%, о котором впервые сообщается в работе [61], может быть связано с обогревом фотосферы звезды мягким рентгеновским излучением, испускаемым горячей

плазмой, заполняющей вспышечную петлю. Для проверки этой гипотезы рассчитано возмущение атмосферы звезды типа Солнца, вызванное облучением внешним источником мягкого рентгена. При этом совместно решались уравнения переноса излучения, статистического равновесия, электронейтральности и лучистого равновесия. Облучение мягким рентгеном вводилось в виде верхнего граничного условия уравнения переноса излучения. Интенсивность этого излучения была рассчитана в пакете CHIANTI в составе Solar Software. В нашей модели это излучение поглощается атомами водорода, гелия, углерода, кислорода, магния и кремния, что и обуславливает нагрев вещества атмосферы. Уравнения статистического равновесия решались методом, развитым Райбики и Хаммером [67], для шести уровней и континуума атома водорода, шести уровней и континуума иона Mg II, пяти уровней и континуума иона Ca II. Концентрация отрицательного иона водорода вычислялась в предположении локального термодинамического равновесия (ЛТР) по отношению к основному состоянию атома водорода. Уравнения электронейтральности и лучистого равновесия решались методом линеаризации. Ионизация атомов гелия, углерода, кислорода, кремния и железа учтены в приближении ЛТР. Все уравнения включены в общую схему итераций, так что в итоге получалось решение одновременно всех уравнений. Уравнение гидростатического равновесия не решалось, т.е. стратификация газа тяжёлых частиц считалась неизменной.

В результате получились модели возмущённой атмосферы: зависимости температуры, электронной плотности, а также населённости атомных уровней от глубины. Это позволило рассчитать спектр выходящего из атмосферы излучения. Ясно, что чем больше мера эмиссии горячей плазмы, облучающей атмосферу, тем сильнее она прогревается и тем сильнее повышается её собственное излучение. Расчёты показали, что при облучении горячей плазмой с мерой эмиссии порядка $10^{54} - 10^{55} \text{ см}^{-3}$, плотностью 10^{12} см^{-3} и температурой 20 МК контраст вспышки в полосе пропускания телескопа Kepler повышается на 0.8%. Обогреваемая рентгеном область фотосферы при этом занимает до 10% видимого диска звезды.

В **заключении** кратко повторяются полученные в диссертации результаты.

Приложение А содержит описание метода бутстрэпа, который применяется в главе 1 для вычисления погрешности, с которой определяются параметры зависимости индекса корональной активности от радиуса и периода вращения звезды.

В **приложении Б** дан вывод уравнения лучистого равновесия, основанный на формализме Райбики и Хаммера [67]; это уравнение использовалось в расчётах, описанных в главе 4.

В приложении В помещён каталог жёстких рентгеновских вспышек на Солнце по наблюдениям на Mars Odyssey/HEND, которому посвящена глава 2, а также краткое описание приведённых в нём данных.

Литература

- [1] Haisch B. M. An overview of solar and stellar flare research // *Solar Physics*. 1989. Vol. 121. P. 3–18.
- [2] Wright N. J., Drake J. J., Mamajek E. E., Henry G. W. The Stellar-activity-Rotation Relationship and the Evolution of Stellar Dynamos // *Astrophysical Journal*. 2011. Vol. 743. P. 48. [arXiv:astro-ph.SR/1109.4634](#).
- [3] Marsden S. C., Petit P., Jeffers S. V. et al. A BCool magnetic snapshot survey of solar-type stars // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 2014. Vol. 444. P. 3517–3536. [arXiv:astro-ph.SR/1311.3374](#).
- [4] Pace G. Chromospheric activity as age indicator. An L-shaped chromospheric-activity versus age diagram // *Astronomy & Astrophysics*. 2013. Vol. 551. P. L8. [arXiv:astro-ph.SR/1301.5651](#).
- [5] McQuillan A., Mazeh T., Aigrain S. Rotation Periods of 34,030 Kepler Main-sequence Stars: The Full Autocorrelation Sample // *The Astrophysical Journal Supplement*. 2014. Vol. 211. P. 24. [arXiv:astro-ph.SR/1402.5694](#).
- [6] Davenport J. R. A. The Kepler Catalog of Stellar Flares // *Astrophysical Journal*. 2016. Vol. 829. P. 23. [arXiv:astro-ph.SR/1607.03494](#).
- [7] Anglada-Escudé G., Amado P. J., Barnes J. et al. A terrestrial planet candidate in a temperate orbit around Proxima Centauri // *Nature*. 2016. Vol. 536. P. 437–440. [arXiv:astro-ph.EP/1609.03449](#).
- [8] Davenport J. R. A., Kipping D. M., Sasselov D. et al. MOST Observations of Our Nearest Neighbor: Flares on Proxima Centauri // *The Astrophysical Journal Letters*. 2016. Vol. 829. P. L31. [arXiv:astro-ph.SR/1608.06672](#).
- [9] Гершберг П. Е. *Активность солнечного типа звёзд главной последовательности*. Одесса: «Астропринт», 2002.
- [10] Hawley S. L., Fisher G. H., Simon T. et al. Simultaneous Extreme-Ultraviolet Explorer and Optical Observations of AD Leonis: Evidence for Large Coronal Loops and the Neupert Effect in Stellar Flares // *Astrophysical Journal*. 1995. Vol. 453. P. 464.

- [11] Guedel M., Benz A. O., Schmitt J. H. M. M., Skinner S. L. The Neupert Effect in Active Stellar Coronae: Chromospheric Evaporation and Coronal Heating in the dMe Flare Star Binary UV Ceti // [Astrophysical Journal](#). 1996. Vol. 471. P. 1002.
- [12] Hawley S. L., Allred J. C., Johns-Krull C. M. et al. Multiwavelength Observations of Flares on AD Leonis // [Astrophysical Journal](#). 2003. Vol. 597. P. 535–554.
- [13] Mitra-Kraev U., Harra L. K., Güdel M. et al. Relationship between X-ray and ultraviolet emission of flares from dMe stars observed by XMM-Newton // [Astronomy & Astrophysics](#). 2005. Vol. 431. P. 679–686. [astro-ph/0410592](#).
- [14] Wargelin B. J., Kashyap V. L., Drake J. J. et al. X-Ray Flaring on the dMe Star, Ross 154 // [Astrophysical Journal](#). 2008. Vol. 676. P. 610–627. [0712.2791](#).
- [15] Mitra-Kraev U., Harra L. K., Williams D. R., Kraev E. The first observed stellar X-ray flare oscillation: Constraints on the flare loop length and the magnetic field // [Astronomy & Astrophysics](#). 2005. Vol. 436. P. 1041–1047. [astro-ph/0503384](#).
- [16] Pugh C. E., Nakariakov V. M., Broomhall A.-M. A Multi-period Oscillation in a Stellar Superflare // [The Astrophysical Journal Letters](#). 2015. Vol. 813. P. L5. [arXiv:astro-ph.SR/1510.03613](#).
- [17] Pugh C. E., Armstrong D. J., Nakariakov V. M., Broomhall A.-M. Statistical properties of quasi-periodic pulsations in white-light flares observed with Kepler // [Monthly Notices of the Royal Astronomical Society](#). 2016. Vol. 459. P. 3659–3676. [arXiv:astro-ph.SR/1604.03018](#).
- [18] Abranin E. P., Alekseev I. Y., Avgoloupis S. et al. Coordinated Observations of the Red Dwarf Flare Star EV LAC in 1994 and 1995 // [Astronomical and Astrophysical Transactions](#). 1998. Vol. 17. P. 221–262.
- [19] Katsova M. M., Drake J. J., Livshits M. A. New Insights into the Large 1992 July 15–17 Flare on AU Microscopii: The First Detection of Post-eruptive Energy Release on a Red Dwarf Star // [Astrophysical Journal](#). 1999. Vol. 510. P. 986–998.
- [20] Argiroffi C., Reale F., Drake J. J. et al. A stellar flare-coronal mass ejection event revealed by X-ray plasma motions // [Nature Astronomy](#). 2019. Vol. 3. P. 742–748. [arXiv:astro-ph.SR/1905.11325](#).
- [21] Katsova M. M., Livshits M. A. The Origin of Superflares on G-Type Dwarf Stars of Various Ages // [Solar Physics](#). 2015. Vol. 290. P. 3663–3682. [arXiv:astro-ph.SR/1508.00254](#).

- [22] Pallavicini R., Golub L., Rosner R. et al. Relations among stellar X-ray emission observed from Einstein, stellar rotation and bolometric luminosity // [Astrophysical Journal](#). 1981. Vol. 248. P. 279–290.
- [23] Katsova M. M. Outer atmospheres and rotation of the late-type stars. // [Astronomicheskij Tsirkulyar](#). 1981. Vol. 1154. P. 1–4.
- [24] Walter F. M. On the coronae of rapidly rotating stars. III - an improved coronal rotation-activity relation in late type dwarfs // [Astrophysical Journal](#). 1982. Vol. 253. P. 745–751.
- [25] Vilhu O. The nature of magnetic activity in lower main sequence stars // [Astronomy & Astrophysics](#). 1984. Vol. 133. P. 117–126.
- [26] Micela G., Sciortino S., Serio S. et al. Einstein X-ray survey of the Pleiades - The dependence of X-ray emission on stellar age // [Astrophysical Journal](#). 1985. Vol. 292. P. 172–180.
- [27] Pizzolato N., Maggio A., Micela G. et al. The stellar activity-rotation relationship revisited: Dependence of saturated and non-saturated X-ray emission regimes on stellar mass for late-type dwarfs // [Astronomy & Astrophysics](#). 2003. Vol. 397. P. 147–157.
- [28] Noyes R. W., Hartmann L. W., Baliunas S. L. et al. Rotation, convection, and magnetic activity in lower main-sequence stars // [Astrophysical Journal](#). 1984. Vol. 279. P. 763–777.
- [29] Reiners A., Schüssler M., Passegger V. M. Generalized Investigation of the Rotation-Activity Relation: Favoring Rotation Period instead of Rossby Number // [Astrophysical Journal](#). 2014. Vol. 794. P. 144. [arXiv:astro-ph.SR/1408.6175](#).
- [30] Gregory S. G. [The long-term evolution of stellar activity](#) // [Living Around Active Stars](#) / Ed. by D. Nandy, A. Valio, P. Petit. Vol. 328 of IAU Symposium. 2017. P. 252–263. [arXiv:astro-ph.SR/1612.04587](#).
- [31] Soderblom D. R., Stauffer J. R., Hudon J. D., Jones B. F. Rotation and chromospheric emission among F, G, and K dwarfs of the Pleiades // [The Astrophysical Journal Supplement](#). 1993. Vol. 85. P. 315–346.
- [32] Vidotto A. A., Gregory S. G., Jardine M. et al. Stellar magnetism: empirical trends with age and rotation // [Monthly Notices of the Royal Astronomical Society](#). 2014. Vol. 441. P. 2361–2374. [arXiv:astro-ph.SR/1404.2733](#).

- [33] Notsu Y., Maehara H., Honda S. et al. Do Kepler Superflare Stars Really Include Slowly Rotating Sun-like Stars?—Results Using APO 3.5 m Telescope Spectroscopic Observations and Gaia-DR2 Data // [Astrophysical Journal](#). 2019. Vol. 876. P. 58. [arXiv:astro-ph.SR/1904.00142](#).
- [34] Carmichael H. A Process for Flares // NASA Special Publication. 1964. Vol. 50. P. 451.
- [35] Sturrock P. A. Model of the High-Energy Phase of Solar Flares // [Nature](#). 1966. Vol. 211. P. 695–697.
- [36] Hirayama T. Theoretical Model of Flares and Prominences. I: Evaporating Flare Model // [Solar Physics](#). 1974. Vol. 34. P. 323–338.
- [37] Kopp R. A., Pneuman G. W. Magnetic reconnection in the corona and the loop prominence phenomenon // [Solar Physics](#). 1976. Vol. 50. P. 85–98.
- [38] van den Oord G. H. J., Mewe R. The X-ray flare and the quiescent emission from Algol as detected by EXOSAT // [Astronomy & Astrophysics](#). 1989. Vol. 213. P. 245–260.
- [39] Reale F. Diagnostics of stellar flares from X-ray observations: from the decay to the rise phase // [Astronomy & Astrophysics](#). 2007. Vol. 471. P. 271–279. [0705.3254](#).
- [40] Kopp R. A., Poletto G. Extension of the reconnection theory of two-ribbon solar flares // [Solar Physics](#). 1984. Vol. 93. P. 351–361.
- [41] Grinin V. P., Sobolev V. V. Theory of flare stars // [Astrophysics](#). 1977. Vol. 13. P. 348–357.
- [42] Grinin V. P., Sobolev V. V. On the Initial Phase of the Flares of the Uv-Ceti Type Stars // [Astrofizika](#). 1988. Vol. 28. P. 355.
- [43] Grinin V. P., Sobolev V. V. On the Gas Heating in Stellar Flares - Part One - the Heating by Protons // [Astrofizika](#). 1989. Vol. 31. P. 527.
- [44] Grinin V. P., Loskutov V. M., Sobolev V. V. Gas heating in stellar flares. Heating by electrons // [Astronomy Reports](#). 1993. Vol. 37. P. 182–187.
- [45] Aboudarham J., Henoux J. C. Electron beam as origin of white-light solar flares // [Solar Physics](#). 1989. Vol. 121. P. 19–30.
- [46] Hawley S. L., Fisher G. H. X-ray-heated models of stellar flare atmospheres - Theory and comparison with observations // [The Astrophysical Journal Supplement](#). 1992. Vol. 78. P. 565–598.
- [47] Kostiuik N. D., Pikelner S. B. Gasdynamics of a flare region heated by a stream of high-velocity electrons // [Soviet Ast.](#). 1975. Vol. 18. P. 590–599.

- [48] Livshits M. A., Badalian O. G., Kosovichev A. G., Katsova M. M. The optical continuum of solar and stellar flares // [Solar Physics](#). 1981. Vol. 73. P. 269–288.
- [49] Katsova M. M., Kosovichev A. G., Livshits M. A. Origin of the Optical Continuum of Flares on Red Dwarfs // [Astrophysics](#). 1981. Vol. 17. P. 156–165.
- [50] Katsova M. M., Boiko A. Y., Livshits M. A. The gas-dynamic model of impulsive stellar flares. // [Astronomy & Astrophysics](#). 1997. Vol. 321. P. 549–556.
- [51] Fisher G. H., Canfield R. C., McClymont A. N. Flare loop radiative hydrodynamics. V - Response to thick-target heating. VI - Chromospheric evaporation due to heating by nonthermal electrons. VII - Dynamics of the thick-target heated chromosphere // [Astrophysical Journal](#). 1985. Vol. 289. P. 414–441.
- [52] Cheng C.-C., Pallavicini R. Numerical simulations of flares on M dwarf stars. I - Hydrodynamics and coronal X-ray emission // [Astrophysical Journal](#). 1991. Vol. 381. P. 234–249.
- [53] Abbett W. P., Hawley S. L. Dynamic Models of Optical Emission in Impulsive Solar Flares // [Astrophysical Journal](#). 1999. Vol. 521. P. 906–919.
- [54] Allred J. C., Kowalski A. F., Carlsson M. A Unified Computational Model for Solar and Stellar Flares // [Astrophysical Journal](#). 2015. Vol. 809. P. 104. [arXiv:astro-ph.SR/1507.04375](#).
- [55] Heinzel P., Kašparová J., Varady M. et al. [Numerical RHD simulations of flaring chromosphere with Flarix](#) // [Solar and Stellar Flares and their Effects on Planets](#) / Ed. by A. G. Kosovichev, S. L. Hawley, P. Heinzel. Vol. 320 of IAU Symposium. 2016. P. 233–238. [arXiv:astro-ph.SR/1602.00016](#).
- [56] Martínez Oliveros J.-C., Hudson H. S., Hurford G. J. et al. The Height of a White-light Flare and Its Hard X-Ray Sources // [The Astrophysical Journal Letters](#). 2012. Vol. 753. P. L26. [arXiv:astro-ph.SR/1206.0497](#).
- [57] Heinzel P., Kleint L., Kašparová J., Krucker S. On the Nature of Off-limb Flare Continuum Sources Detected by SDO/HMI // [Astrophysical Journal](#). 2017. Vol. 847. P. 48. [arXiv:astro-ph.SR/1709.06377](#).
- [58] Krucker S., Hudson H. S., Jeffrey N. L. S. et al. High-resolution Imaging of Solar Flare Ribbons and Its Implication on the Thick-target Beam Model // [Astrophysical Journal](#). 2011. Vol. 739. P. 96.

- [59] Namekata K., Sakaue T., Watanabe K. et al. Statistical Studies of Solar White-light Flares and Comparisons with Superflares on Solar-type Stars // *Astrophysical Journal*. 2017. Vol. 851. P. 91. [arXiv:astro-ph.SR/1710.11325](#).
- [60] He H., Wang H., Zhang M. et al. Activity Analyses for Solar-type Stars Observed with Kepler. II. Magnetic Feature versus Flare Activity // *The Astrophysical Journal Supplement*. 2018. Vol. 236. P. 7. [arXiv:astro-ph.SR/1705.09028](#).
- [61] Maehara H., Shibayama T., Notsu S. et al. Superflares on solar-type stars // *Nature*. 2012. Vol. 485. P. 478–481.
- [62] Rosén L., Kochukhov O., Hackman T., Lehtinen J. Magnetic fields of young solar twins // *Astronomy & Astrophysics*. 2016. Vol. 593. P. A35. [arXiv:astro-ph.SR/1605.03026](#).
- [63] McQuillan A., Aigrain S., Mazeh T. Measuring the rotation period distribution of field M dwarfs with Kepler // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 2013. Vol. 432. P. 1203–1216. [arXiv:astro-ph.SR/1303.6787](#).
- [64] Brown J. C. The Deduction of Energy Spectra of Non-Thermal Electrons in Flares from the Observed Dynamic Spectra of Hard X-Ray Bursts // *Solar Physics*. 1971. Vol. 18. P. 489–502.
- [65] Syrovatskii S. I., Shmeleva O. P. Heating of Plasma by High-Energy Electrons, and Nonthermal X-Ray Emission in Solar Flares // *Soviet Ast.*. 1972. Vol. 16. P. 273.
- [66] Kane S. R., McTiernan J. M., Hurley K. Multispacecraft observations of the hard X-ray emission from the giant solar flare on 2003 November 4 // *Astronomy & Astrophysics*. 2005. Vol. 433. P. 1133–1138.
- [67] Rybicki G. B., Hummer D. G. An accelerated lambda iteration method for multilevel radiative transfer. II - Overlapping transitions with full continuum // *Astronomy & Astrophysics*. 1992. Vol. 262. P. 209–215.