

Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 120, № 2, 36–66 (2024)

УДК 524.3

Звезды с активностью солнечного типа: исследования последних лет*

Р.Е. Гершберг

ФГБУН “Крымская астрофизическая обсерватория РАН”, Научный, 298409, Крым
gershberg@craocrimea.ru

Поступила в редакцию 2 февраля 2024 г.

Аннотация. В работе систематизированы и обобщены основные результаты исследований звезд с активностью солнечного типа – от красных и коричневых карликов до солнцеподобных звезд. Рассмотрены исследования, проведенные преимущественно в 2020-х годах, и полученные результаты сгруппированы по разделам: базы данных и каталоги, фотосферы и звездные пятна, вращение, хромосфера, корона, вспышки, магнитные поля, циклы активности и экзопланеты.

Ключевые слова: красные карлики и звезды солнечного типа, базы данных и каталоги, фотосферы и звездные пятна, вращение, хромосфера, корона, вспышки, магнитные поля, циклы активности и экзопланеты

1 Введение

При наблюдениях области Эта Киля на 10-дюймовом телескопе в Иоганнесбурге датский астроном Эйнар Герцшпрунг ([Hertzsprung, 1924](#)) обнаружил на пластинке 29 января 1924 года новую переменную звезду: на третьем из пяти получасовых снимков, полученных в ту ночь, она оказалась ярче на $1^m.8$, чем на первых двух, на четвертом – на $1^m.1$ и на пятом – на $0^m.75$. На всех 37 пластинках, полученных за 19 ночей, звезда имела низкую яркость. Герцшпрунг заметил, что обнаруженный характер переменности не позволяет отождествить звезду ни с переменной типа RR Lyræ, ни с новой, и связал ее вспышку с падением на звезду малой планеты. Как потом выяснилось, так были открыты вспыхивающие красные карлики, а переменная Герцшпрунга получила стандартное обозначение DH Car. В течение ста лет на этом M4-карлике никакие другие проявления активности не были обнаружены.

В последующие четверть века были открыты еще несколько таких звезд, но трудности наблюдений из-за их слабого блеска не вызвали особого интереса. С прогрессом в технике наблюдений и новыми методами обработки получаемых данных в середине минувшего века ситуация изменилась. Когда в фотометрии звезд возобладала электрофотометрия, она заменила объективностью визуальные наблюдения и высокой точностью, чувствительностью и временным разрешением фотографические исследования. В результате были открыты сотни красных карликовых звезд, составлены первые каталоги таких переменных, установлена непериодичность их вспышек, обнаружен степенной характер энергетического спектра вспышек, по фотометрическим рядам в десятки лет обнаружена цикличность активности таких звезд. С установкой на крупных телескопах спектрографов с чувствительными детекторами были получены спектры вспышек с высоким временным разрешением, обнаружен характер изменения различных спектральных линий вспышек на разных фазах их развития, определены параметры звездных хромосфер в спокойном и вспышечном состояниях, температуры, плотности и скорости движения вещества вспышек. В конечном счете это привело к открытию физической идентичности вспышечной активности красных карликов и активности

* Настоящий обзор подготовлен к крымской конференции “Звезды с активностью солнечного типа – исследования последних лет”, посвященной столетию со дня открытия Эйнаром Герцшпрунгом вспыхивающих красных карликов (КраО, 26–27 февраля 2024 года).

Солнца. Спектры высокого разрешения и спектрополяриметрические методы привели к открытию звездных магнитных полей. С появлением крупных радиотелескопов были открыты звездные короны, измерено их тепловое излучение в спокойном состоянии звезд и нетепловое излучение вспышек. С выходом в космос астрономических аппаратов стало доступно ультрафиолетовое и рентгеновское излучение вспыхивающих звезд, их зарегистрированные линейчатые спектры позволили оценить параметры верхних атмосфер этих звезд. Для анализа этих богатых экспериментальных данных одновременно проводились и необходимые теоретические исследования. Была развита теория балмеровского декремента для условий атмосфер таких звезд, предложены различные методы оценки параметров холодных звездных пятен, развита теория генерации магнитных полей на звездах, позволившая оценивать структуры и напряженности этих полей.

Последний по времени крупный шаг в экспериментальном изучении звезд с активностью солнечного типа – это вывод в космос телескопов для панорамной фотометрии звездных полей. Они дают возможность одновременных наблюдений тысяч объектов длительное время и с высоким временным разрешением. В результате были открыты весьма редкие звездные вспышки, на 2–3 порядка величины превосходящие по энергетике самые мощные солнечные вспышки, созданы каталоги таких звезд, самые крупные из которых содержат сотни тысяч объектов.

В 2020 году была опубликована большая монография Гершберга, Клиорина, Пустильника и Шляпникова “Физика звезд средних и малых масс с активностью солнечного типа”, в которой довольно подробно изложена история изучения этих объектов – от открытия Герцшпрунга до написания этой книги. Здесь неуместно повторять результаты, изложенные в монографии. Но за прошедшие несколько лет получены новые важные результаты и число публикаций по рассматриваемой теме приблизилось к двум сотням. Именно они и ныне ведущиеся исследования, а также по тем или иным причинам несколько пропущенных в монографии публикаций, рассматриваются в этом обзоре.

В выпуске бюллетеня “Астрономические новости” от 27 октября 2023 г. была опубликована заметка, посвященная 150-летию со дня рождения Эйнара Герцшпрунга, которая в несколько сокращенном виде представлена ниже.

Эйнар Герцшпрунг родился 8 октября 1873 г. в местечке Фредериксборг близ Копенгагена. Учился в Копенгагенском политехническом институте, получил специальность инженера-химика. По окончании института в 1898 г. в течение трех лет работал в Петербурге. Вернувшись на родину, стал изучать астрономию, одновременно проводил фотографические наблюдения в обсерватории Копенгагена, затем в Потсдаме и Лейдене, где в 1935 г. стал директором.

Основные научные работы Герцшпрунга относятся к астрофизике и звездной астрономии. В 1905–1907 гг. он открыл существование звезд-гигантов и звезд-карликов, показав, что звезды с одинаковой температурой могут иметь существенно разные светимости. Он определил собственные движения многих звезд в области скопления Плеяды с целью выделения членов скопления. Впервые отметил различия в звездном населении скоплений Плеяды, Гиады и Ясли, которые впоследствии были объяснены различием в возрасте этих скоплений. Выполнил огромное количество измерений двойных и переменных звезд по их фотографиям. Прокалибровал полученное Х.С. Ливитт соотношение между блеском и периодом для переменных звезд в Малом Магеллановом Облаке, показав, что эти переменные являются цефеидами; определил с помощью этого соотношения расстояние до Малого Магелланова Облака. Установил зависимость между периодом цефеид и формой их кривых блеска. В 1911 г. показал, что Полярная звезда является цефеидой. Герцшпрунг впервые построил диаграмму зависимости видимой звездной величины от показателя цвета для звезд в скоплениях Плеяды и Гиады; впоследствии, когда Г.Н. Рессел построил аналогичную диаграмму для всех звезд с известными тогда расстояниями, она была названа диаграммой Герцшпрунга–Рессела. Эта диаграмма стала краеугольным камнем исследований эволюции звезд.

Как видим, авторы этой справки случайное открытие Герцшпрунгом вспыхивающих красных карликов не сочли достойным упоминания рядом с его фундаментальными результатами.

В настоящем обзоре уделено основное внимание конкретным экспериментальным результатам последних лет, и он состоит из следующих разделов:

1. Базы данных и каталоги.
2. Фотосферы и звездные пятна.
3. Вращение.
4. Хромосферы и протуберанцы.

5. Короны и звездный ветер.
6. Вспышки и супервспышки.
7. Магнитные поля.
8. Цикличность и эволюция активности.
9. Экзопланеты.

Необходимо иметь в виду некоторую условность отнесения многих исследований к тому или иному из перечисленных разделов, поскольку обычно в каждой работе затрагивается более одного из них.

2 Базы данных и каталоги

По данным Gaia DR3 [Distefano et al. \(2023\)](#) составили каталог, содержащий 474 026 звезд, по кривым блеска которых они обнаружили периодические колебания, отнесенные ими к эффектам темных пятен или ярких факелов, то есть к проявлениям звездного магнетизма. Переменность около 430 000 каталогизированных объектов была обнаружена впервые. В каталоге приведены 66 параметров каждой звезды, важнейшие из которых – это периоды вращения, соответствующие амплитуды блеска и коэффициент корреляции Пирсона между блеском и величиной вариации цвета. Использование этого коэффициента позволило разделить рассматриваемые объекты на такие, в которых вариации блеска обусловлены темными пятнами и в которых за эти вариации ответственны яркие факелы.

[Chahal et al. \(2022\)](#) составили каталог переменных типа BY Dra, содержащий 84 697 звезд спектральных типов FGKM главной последовательности (ГП) с пятнами и факелами на фотосфере, и включающий их эффективные температуры, радиусы, светимости, массы, периоды вращения и фотометрические магнитные индексы S_{ph} в полосах g и r. Более половины этой выборки являются K-звездами, и 94 % объектов имеют периоды вращения менее 10 суток и, следовательно, это молодые звезды, не прошедшие эффективного торможения. В работе обсуждаются корреляции перечисленных параметров в рамках представлений о различиях звездных структур разных температур, разных возрастов и магнетизма разной степени насыщенности. У K-звезд обнаружилась более высокая магнитоактивная доля, чем у M-звезд.

[Engle \(2024\)](#) составил 15-страничный обзор по рентгену, ультрафиолету и отношению активность–возраст, включающий 20 страниц таблиц с многочисленными параметрами многих M-карликов.

Для массового определения возраста звезд по эмпирическим корреляциям периода вращения, хромосферной активности и возраста [Ye et al. \(2024\)](#) составили каталог, включающий массы и возраст 52 321 FGK-карлика, 47 469 индексов хромосферной активности $\lg R'_{HK}$, 6077 периодов вращения P_{rot} и амплитуды переменности S_{ph} , полученные по наблюдениям на телескопах LAMOST, Kepler и Gaia. Сопоставление этих данных обнаружило выраженную корреляцию между P_{rot} , возрастом и $[Fe/H]$ на протяжении всей фазы ГП для F-карликов. Для G-карликов и P_{rot} , и $\lg R'_{HK}$ являются надежными зондами возраста в диапазонах ~ 2 –11 и ~ 2 –13 млрд лет соответственно. У K-карликов наблюдается заметное снижение $\lg R'_{HK}$ в возрастном диапазоне ~ 3 –13 млрд лет.

[Shlyapnikov \(2024a\)](#) подготовил третью версию “Каталога звезд с активностью солнечного типа” (CSSTA-3). Она содержит 314 618 объектов со следующими данными: главное обозначение объекта, его экваториальные координаты, основной тип объекта, его тип переменности по GCVS, звездная величина V по разным источникам, величины в минимуме и максимуме, спектральный тип из разных источников, эмиссионные линии, индекс хромосферной активности, присутствие пятен или их параметры, ультрафиолет или вспышки в ультрафиолете, инфракрасное излучение, радиоэмиссия или радиовспышки, эффективная температура, оценки радиуса и светимости, период активности по разным источникам, длительность цикла активности, присутствие экзопланет и их число. Подробное описание CSSTA-3 дано в монографии [Gershberg et al. \(2024\)](#).

3 Фотосферы и звездные пятна

В рамках предложенной и разработанной в КрАО зональной модели запятненности звезд [Алексеев, Кожевникова \(2017, 2018\)](#) рассмотрели вариации этой запятненности у 12 M- и 13 G–K-карликов в течение десятилетий и нашли у 11 звезд дрейф пятен к полюсу, у 6 звезд заподозрили циклы

активности длительностью от 25 до 40 лет. Найденные скорости дрейфа пятен по широте оказались в 2–3 раза меньше, чем на Солнце.

[Ioannidis, Schmitt \(2020\)](#) провели на космическом телескопе TESS в течение года фотометрическое исследование молодого быстрого ротатора AB Dor, перекрыв почти 600 его оборотов. Повышенная активность звезды имела место на 11 % времени наблюдений, пятна находились на четко определенных долготах от низких до высоких широт. Положения пятен определялись как дифференциальным вращением звезды, так и продолжительностью их жизни в 10–20 суток. На менее запятненной полусфере звезды частота вспышек оказалась на 60 % меньше, чем на более запятненной, но то обстоятельство, что их число не падает до нуля, интерпретируется как наличие высокоширотных пятен, каких нет на Солнце.

[Johnson et al. \(2021\)](#) опубликовали первый анализ ожидаемых фотометрических особенностей магнитоактивных G–M-звезд с горячими факелами и холодными пятнами. Развитая ими теория строится на кривых блеска в различных фотометрических полосах и опирается на различия в видимости пятен и факелов на разных расстояниях от центра диска и на эффекте потемнения диска к лимбу.

[Senavci et al. \(2021\)](#) выполнили обширные исследования EK Dra в оптическом диапазоне длин волн. Они определили содержания 23 элементов с $[\text{Fe}/\text{H}] = 0.03$ и значительными избытками лития и бария; элементы s-процесса Sr, Y, Ce обнаружили небольшие избытки, тогда как Ni, Cu, Zn – небольшие недостатки относительно солнечных содержаний. Избыток бария наиболее вероятно обусловлен независимой от глубины микротурбулентной скоростью, избыток лития – молодостью объектов. Авторы оценили массу звезды как $1.04 M_{\odot}$ и возраст 27 миллионов лет, что соответствует post T Tau фазе до ГП. Доплеровский анализ наблюдений за 15 суток привел к выводу о существовании околополярного пятна и пятен на средних широтах при их отсутствии на низких широтах.

Сопоставив температуры звездных пятен, найденные методом зональной запятненности у 26 вспыхивающих звезд, с температурами фотосфер этих звезд, [Алексеев, Гершберг \(2021\)](#) нашли неплохую корреляцию этих величин и получили простую формулу для вычисления первых по вторым. Полученные таким образом оценки температур пятен не противоречат результатам, которые дали более сложные оценки с расчетами структуры атмосферы и/или МГД-соображениями.

[Bicz et al. \(2022\)](#) разработали программу моделирования кривых блеска запятненных звезд для оценки числа пятен и их параметров. Используя наблюдения M-карликов на TESS, они нашли наличие двух пятен на GJ 1243 со средней температурой около 2900 К и с запятненностью 3 % поверхности звезды, а также двух пятен на V374 Peg с температурой около 3000 К и запятненностью около 6 % поверхности звезды; для двух наблюдений YZ CMi, разделенных полутора годами, [Bicz et al.](#) нашли трехпятенную модель со средней температурой около 3000 К и запятненностью около 9 %, а также четырехпятенную модель со средней температурой около 2800 К и запятненностью около 7 % поверхности звезды. Другая разработанная ими программа автоматически отыскивает вспышки по кривым блеска. Обнаружены десятки вспышек с энергией 10^{31-34} эрг со временами возгорания от 4 до 77 минут и временами угасания от 12 до 273 минут.

Используя спектры FUV высокого разрешения, полученные на телескопе HST во время вспышки и в спокойном состоянии звезды, [Flagg et al. \(2022\)](#) подтвердили наличие молекулярного водорода в системе AU Mic. Температура газа оценивается от 1000 до 2000 К. Судя по лучевым скоростям и ширине профиля линии H_2 , линия создается в звезде, а не в диске или на планете. Хотя указанная температура гораздо ниже, чем у звезды.

[Katsova et al. \(2022a\)](#) рассмотрели по рентгеновским и ультрафиолетовым данным уровень корональной и хромосферной активности 23 солнечных двойников и обнаружили значительный разброс отношения L_X/L_{bol} и содержания лития, что может связывать явления на поверхности звезд и в основании их конвективных зон. По данным TESS обнаружена вращательная модуляция блеска звезд, обусловленная пятнами. У некоторых звезд выборки периоды вращения близки к 6 суткам, что свидетельствует об их молодости. Самая мощная из вспышек имела энергию $8 \cdot 10^{33}$ эрг и длительность более 4 часов.

[Di Mauro et al. \(2022\)](#) исследовали многолетние наблюдения на TESS магнитоактивной звезды GJ 504, имеющей планету. Авторы предприняли попытки выделить колебательные свойства этой звезды ГП, но не обнаружили никаких пульсаций и заключили, что подавление акустических мод можно объяснить высоким уровнем магнитной активности.

Cao, Pinsonneault (2022) оценили филлинг-факторы пятен в 240 звездах рассеянных скоплений Плеяды и М67, используя оригинальный спектроскопический метод, дающий также разность температур звезда – пятно. В скоплении Плеяды филлинг-фактор насыщается на уровне 0.248 для активных звезд и снижается при более медленном вращении, что можно представить функцией числа Россби. В М67 у GK-звезд ГП средние филлинг-факторы 0.030 и в 10 раз меньше у проэволюционировавших красных гигантов. Эффективные температуры активных звезд смещены на -109 К относительно неактивных.

Связь солнечных вспышек и пятен была установлена на самой ранней стадии изучения солнечной активности. Не исключено, что пионером здесь был в середине 50-х годов минувшего века чешский астрофизик Вацлав Бумба – тогда аспирант А.Б. Северного в КрАО. Интерес к этой идее возрос в последние десятилетия, когда выяснилось, что запятненность активных красных карликов превышает солнечную на 2–3 порядка величины и столь же более мощны максимальные звездные вспышки по сравнению с солнечными. Здесь следует отметить недавний интересный результат Katsova et al. (2022a). Они показали, что частота слабых вспышек практически не зависит от степени запятненности Солнца, тогда как частота сильных вспышек заметно нарастает во все более крупных активных областях. Это обстоятельство объясняет, в частности, отсутствие на Солнце супервспышек.

Yamashita et al. (2022) рассмотрели свидетельства активности у звезд ГП нулевого возраста, где ожидаются огромные звездные пятна и сильные хромосферные эмиссионные линии. По данным TESS они получили кривые блеска 33 звезд в IC 2391 и IC 2602, амплитуды кривых блеска составили $0^m.001 - 0^m.145$, филлинг-фактор пятен – 0.1–21%. Зарегистрирована 21 вспышка с энергиями 10^{33-35} эрг.

Xu et al. (2022) проанализировали пятна и хромосферную активность звезды HD 34319 по наблюдениям на TESS, а также по спектроскопии в Верхнем Провансе (Haute-Provence Observatory) и на телескопе Keck (W.M. Keck Observatory) в 1995–2013 гг. Они применили двухпятенную модель с периодом вращения 4.4364 суток, измерили эквивалентные ширины линий Ca II и водорода и предложили схему развития пятен. Однако обращение к двухпятенной концепции Родано (La Fauci, Rodono, 1983) сорокалетней давности удивляет.

Martin et al. (2024) обратили внимание на важную роль в исследовании М-карликов затменной системы CM Dra. Это достаточно яркая система, видимая с ребра и состоящая из двух полностью конвективных карликов, чьи радиусы и массы были известны с точностью лучше 1%, а в этом исследовании точности были повышены до 0.06% и 0.12%. Далее, Martin et al. обнаружили сильную и переменную пятенную модуляцию, наводящую на предположение о группировке пятен и циклы активности в годы. Наконец, они открыли 125 вспышек, причем частота вспышек не уменьшалась во время затмений, и высказали предположение, что вспышки предпочтительно полярные.

Ikuta et al. (2023) проанализировали полученные на TESS кривые блеска AU Mic, YZ CMi и EV Lac и оценили положения на них пятен. Обнаружено, что частота возникновения вспышек не обязательно коррелирует с фазами вращения, что может быть обусловлено вариациями размера пятен и их широты.

Araújo, Valio (2023) исследовали активность двух К-звезд, наблюдавшихся обсерваторией Kepler, сходных во всем от массы до периода вращения и планетных систем. Обе звезды демонстрируют около сотни пятен, найденных методом транзитного картирования, но на звезде Кеплер-411 произошло 65 супервспышек, а на звезде Кеплер-210 – ни одной. А параметры пятен определенно отличаются: их средние радиусы 17 и 58 тысяч км, контраст с фотосферами 0.35 и 0.64, температуры 3800 и 4180 К, то есть пятна на звезде без супервспышек крупнее, менее темные и несколько горячее, чем на звезде с супервспышками. Возможно, это указывает на меньшую напряженность магнитного поля либо на его более простую структуру.

По вековой фотометрии и 200-суточной спектроскопии высокого разрешения в 2018 году Kovari et al. (2024) исследовали кратную систему V815 Her. По многочисленным фотометрическим циклам от 6.5 до ~ 26 лет они обнаружили весьма сложную систему: V815 Her Aa – это солнцеподобная запятненная звезда ГП нулевого возраста со слабым дифференциальным вращением, третье тело – V815 Her B – затменная тесная двойная с периодом 0.5 суток, состоящая из двух М-карликов, а объект в целом – молодая четверная иерархическая структура 2 + 2.

Di Maio et al. (2024) представили метод, позволяющий моделировать звездную фотосферу с пятнами у молодых активных и быстро вращающихся звезд. В рамках проекта “Глобальная архитектура планетных систем” они проанализировали более 300 спектров молодой звезды-хозяина V1298 Tau со

спектрографа высокого разрешения HARPS-N в предположении, что дифференциальное вращение повышает угловую скорость на экваторе. Анализ авторов подтвердил, что предложенная модель повышает чувствительность и способность восстанавливать информацию о планетах и моделировать звездную фотосферу.

Monson et al. (2024) исследовали влияние вспышек в звездных атмосферах на состояние подфотосферного вещества. Используя радиационно-гидродинамические расчеты и расчеты переноса излучения для моделирования реакции атмосферы на нагрев электронным пучком, они синтезировали линии нейтрального железа для получения доплеровских сдвигов в профиле интенсивности и показали, что голубые смещения в ядре линии зависят от относительного вклада хромосферы по сравнению с фотосферой. Сделан вывод, что глубоко формирующиеся линии требуют многокомпонентного рассмотрения, причем разные участки спектральной линии полезны для исследования отдельных областей скоростных потоков атмосферы.

4 Вращение

Popinchalk et al. (2021) установили основы гирохронологии М-карликов. Они собрали данные о периодах вращения 713 М0–М8-звезд, определенные по кривым блеска, полученным обсерваторией Kepler, и включили также данные о периодах вращения звезд скоплений возрастом от 5 до 700 миллионов лет и объекты старше 1 млрд лет. Используя параллаксы из Gaia 2 и фотометрию $G - G_{RP}$, они построили диаграмму цвет – величина и на графике цвет – период проанализировали распределение периодов по возрасту, а также распределение эквивалентных ширин линии $H\alpha$ и тангенциальных скоростей. Авторы нашли, что возраст перехода от быстрого к медленному вращению в скоплениях, определенный как излом на графиках период – цвет, зависит от спектрального типа, и чем позднее спектральный тип, тем больше возраст. Здесь же имеет место переход от активной к неактивной линии $H\alpha$. Более красные и меньшие звезды остаются активными до большего возраста.

Используя спектрополяриметрию на Большом бинокулярном телескопе, литературные данные по зеемановским доплеровским изображениям, данные рентгеновского излучения, Gaia и астросейсмологии, Metcalfe et al. (2022) сопоставили скорости вращения компонентов пар звезд солнечного типа разного возраста, оценили скорость потери ими углового момента и нашли, что от 2.6 до 3.7 млрд лет она падает более чем на порядок величины и затем продолжает медленно уменьшаться до 7 млрд лет.

По данным TESS, Gaia и собственным спектральным наблюдениям высокого разрешения Medina et al. (2022) составили полную выборку 219 одиночных М-карликов с массой 0.1–0.3 M_{\odot} в пределах 15 пс от Солнца и провели анализ их кинематических характеристик и параметров активности. Они нашли, что в распределении частот вспышек по энергии у всех звезд показатель степени составляет 1.984 ± 0.019 . Если считать, что в тонком диске Галактики звезды постоянно образуются последние 8 млрд лет, то переход от насыщенного к ненасыщенному режиму активности имеет место в 2.4 ± 0.3 млрд лет. Звезды с периодами вращения менее 10 суток имеют возраст 2.0 ± 1.2 млрд лет, с периодами от 10 до 90 суток – 5.6 ± 2.7 млрд лет и с периодами более 90 суток – 12.9 ± 3.5 млрд лет. Звезды с периодами вращения менее 10 суток и массой 0.2–0.3 M_{\odot} имеют средний возраст 0.6 ± 0.3 млрд лет, а с массой 0.1–0.2 M_{\odot} – возраст 2.3 ± 1.3 млрд лет.

Lu et al. (2022) с помощью автоматизированной системы обзора неба Zwicky Transient Facility составили каталог, содержащий периоды вращения 40 553 звезд.

Kitchatinov (2022) выдвинул оригинальную идею о том, что наблюдаемая цикличность активности звезд появляется не из-за торможения вращения, а из-за более сильной зависимости от эффективной температуры.

На стадии до ГП скорость вращения солнцеподобной звезды определяется взаимодействием протозвездного диска и сжатием звезды. При возрасте выше 100 миллионов лет магнитное торможение подавляет начальную скорость вращения звезды и устанавливается вращение, определяемое гирохронологией. Точное время перехода между этими режимами определяется массой звезды и требует экспериментальной калибровки. Для использования открытого скопления α Per в качестве калибратора Boyle, Bouma (2023) провели совместный анализ данных, полученных на TESS, Gaia и LAMOST, составили обширный список звезд одного возраста и заключили, что возраст наиболее разбросанных членов скопления близок к 50 миллионам лет.

Используя наблюдения AU Mic на TESS, [Lin, Poppenhaeger \(2022\)](#) попытались проверить гипотезу о том, происходят ли на звезде события магнитной активности в фазе с орбитой AU Mic b. В течение примерно 50 суток наблюдений распределение вспышек с орбитальным, вращательным и синодическим периодами в целом соответствовало собственным звездным вспышкам. Для проверки указанной гипотезы необходимо увеличить длительность мониторинга в 2–3 раза.

По спектрополяриметрии 18 Sco и 16 Cyg AB на Большом бинокулярном телескопе [Metcalfe et al. \(2022\)](#) рассмотрели торможение скоростей вращения солнечных аналогов возраста от 2 до 7 млрд лет и предоставили дополнительные ограничения на характер и время этого процесса. Они рассчитали ветровой тормозный момент каждой звезды в эволюционной последовательности и нашли, что скорость потери углового момента падает более чем на порядок величины между возрастными HD 76151 и 18 Sco – 2.6 и 3.7 млрд лет – и продолжает уменьшаться у Cyg AB – 7 млрд лет.

Как показали [Reinhold et al. \(2022\)](#), для определения периода вращения звезд с аperiодическими кривыми блеска можно использовать метод GPS (Gradient of the Power Spectrum), основанный на анализе не спектра мощности, а градиента спектра мощности. Авторы показали, что GPS-метод способен определить правильный период вращения в 40 % всех рассмотренных случаев и значительно превосходит методы автокорреляции.

Для изучения связи вращения и активности [Núñez et al. \(2022, 2024\)](#) получили оптические спектры 250 звезд, данные о рентгеновских светимостях для 10 звезд и о периодах вращения для 28 звезд в скоплении Ясли; в скоплении Гиады аналогичные новые данные относятся к 131, 22 и 137 звездам. Эти данные были использованы для подсчета чисел Россби и отношений $L_{H\alpha}/L_{bol}$ и L_X/L_{bol} . При возрасте скоплений около 700 млн лет почти все M-карлики обнаруживают эмиссию линии H α , причем двойные системы и одиночные звезды имеют одинаковое распределение по цвету и по эквивалентной ширине этой эмиссии. Авторы обнаружили, что критическое значение числа Россби, при котором происходит насыщение активности, меньше для рентгена, чем для линии H α . Но эти излучения по интенсивности близки, что позволяет предположить, что корона и хромосфера испытывают одинаковый магнитный нагрев.

[Monsch et al. \(2023\)](#) исследовали связь времени жизни околозвездных дисков и эволюции вращения звезд малых масс. Используя модель испарения под действием ультрафиолетового и рентгеновского излучения, они получили простой алгоритм для расчета влияния блокировки дисков на эволюцию вращения. [Monsch et al.](#) обнаружили, что продолжительность фазы блокировки диска влияет на последующую вращательную эволюцию молодой звезды. Этот подход приводит к согласию расчетов с наблюдаемыми распределениями периодов вращения в рассеянных скоплениях разных возрастов.

По выборке из 44 звезд ГП с хорошо известными периодами циклов активности и периодами вращения [Mittag et al. \(2023\)](#) исследовали связь между этими параметрами. Они нашли линейное поведение в двойном логарифмическом соотношении между числом Россби и периодом цикла. Бифуркация на длиннопериодическую и короткопериодическую ветви явно реальна, но зависит от B–V, то есть от эффективной температуры и положения на ГП. Существует также корреляция между продолжительностью цикла и временем конвективного оборота. На этом основании выведены эмпирические зависимости между периодом цикла и числом Россби. При этом период Швабе на Солнце составляет около 10.3 года, а цикл Глейсберга длится примерно 104 года. Далее, авторы предположили, что циклы на короткопериодической ветви генерируются в более глубоких слоях конвективной зоны, а циклы длиннопериодической ветви связаны с меньшим числом глубоких слоев в этой зоне, и что для более широкого диапазона B–V число Россби является более подходящим параметром для универсальной связи, чем только период вращения.

[Carmona et al. \(2023\)](#) исследовали в ближнем инфракрасном и оптическом диапазонах вращение AD Leo, чтобы выяснить, является ли 2.23-суточный период результатом осевого вращения звезды или следствием обращения экзопланеты. Наблюдения проводились в Верхнем Провансе и на Гавайях, достигнутая точность определения лучевых скоростей составила 3–5 м/с и 2 м/с соответственно. Сделан вывод о том, что связи с экзопланетой здесь нет.

В первой половине жизни на ГП из-за магнитного торможения звезды быстро теряют угловой момент, но когда число Россби достигает критического значения, торможение заметно ослабевает. [Metcalfe et al. \(2023\)](#) проанализировали новую спектрополяриметрию старого G8-карлика τ Cet и зееман-доплеровское изображение более молодой G8-звезды 61 UMa и заключили, что скорости торможения за время от 1.4 до 9 млрд лет падают в 300 раз.

Valio, Araújo (2023) впервые представил анализ дифференциального вращения звезд с использованием карт транзита звездных пятен у солнцеподобных звезд и у М-карликов. Он представил дифференциальные профили вращения у 13 наблюдавшихся обсерваториями Kepler и CoRoT медленно вращающихся звезд с периодами вращения более 4.5 суток спектральных типов от М до F. Результаты анализа показали значительную отрицательную корреляцию с коэффициентом -0.77 между вращательным сдвигом $\Delta\Omega$ и средним периодом вращения звезды. С другой стороны, обнаружилась слабая корреляция между дифференциальным вращением и эффективной температурой звезды.

Saunders et al. (2024) обсудили, до какой степени ослабленное магнитное торможение приводит к устойчивому быстрому вращению старых звезд. Они обнаружили, что выборка звезд с периодами вращения и возрастом, измеренными с помощью астросейсмологии, согласуется с моделями, которые отклоняются от стандартного вращения до достижения эволюционной стадии Солнца. Определено нормализованное критическое число Россби $Ro_{\text{crit}}/Ro_{\odot} = 0.91 \pm 0.03$ как порог отклонения от стандартной вращательной эволюции, то есть ослабленное магнитное торможение сказывается примерно на половине времени существования на ГП солнцеподобных звезд.

Shan et al. (2024) определили периоды вращения большой выборки М0–М9-карликов, найденные фотометрически и спектроскопически, и составили таблицу, включающую 261 период. Они рассмотрели зависимость вращения – активность с эмиссией в рентгене, линии $H\alpha$ и линиях H и K ионизованного кальция и напряженностью поверхностного магнитного поля и показали периоды вращения как функцию звездной массы, возраста и галактической кинематики. За исключением трех транзитных планетных систем и TZ Agi, все планетосодержащие звезды этой выборки имеют периоды вращения более или около 15 суток.

5 Хромосферы и протуберанцы

В отличие от классического рассмотрения штарковского уширения спектральных линий за счет микрополей частиц плазмы, Окс (1981, 2006) предложил и развил концепцию штарковского уширения за счет низкочастотной турбулентности электростатической плазмы – LEPT. И этот механизм может оказаться доминирующим фактором. Сперва Коваль, Окс (1983) рассмотрели профили водородной эмиссии H_5 – H_{11} двух сильных солнечных протонных вспышек, зарегистрированных в Крыму, и нашли, что они уширены механизмом LEPT. Недавно Oks, Gershberg (2016) проанализировали три спектрограммы двух вспышек AD Leo и вспышку EV Lac и нашли, что в рамках классического Штарк-эффекта ширины линий H_{α} – H_{δ} дают очень высокую электронную плотность излучающей плазмы, 10^{15} см^{-3} , тогда как в рамках LEPT она оказывается достаточно близка к электронной плотности, полученной Кацова (1990) по бальмеровскому декременту спектров вспышек.

Leitzinger et al. (2022) рассмотрели событие на молодом Me-карлике V374 Peg, в ходе которого на синей стороне бальмеровских линий появилось дополнительное излучение. Путем 1D NLTE-расчета они представили распределение физических параметров в структуре, ответственной за это излучение, и обнаружили, что, за исключением температуры и площади, все параметры находятся в верхнем диапазоне типичных параметров солнечных протуберанцев, а температура и площадь оказались выше, чем у типичных солнечных протуберанцев. Но моделей со структурой волокон оказывается больше, чем с геометрией протуберанцев.

По обширным данным Gaia DR3 Lanzafame et al. (2023) провели систематический анализ свечения в звездах инфракрасного триплета Ca II. Рассмотрены положения этих звезд на диаграмме цвет–величина и корреляция с амплитудой фотометрической вращательной модуляции. Они нашли, что самый высокий уровень активности инфракрасного триплета связан с PMS-звездами и RS CVn двойными системами, а также обнаружили некоторые свидетельства бимодального распределения звезд на ГП при $T_{\text{eff}} > 5000 \text{ K}$. Звезды с температурами $3500 \text{ K} < T_{\text{eff}} < 5000 \text{ K}$ оказались либо очень активными PMS-звездами, либо активными звездами ГП с униполярным распределением. Резкое изменение распределения активности найдено для $T_{\text{eff}} < 3500 \text{ K}$ с доминированием звезд низкой активности вблизи перехода между частично и полностью конвективными звездами и подъемом активности в условиях полной конвекции.

Meunier et al. (2022) рассмотрели соотношения хромосферных эмиссий в линиях $H\alpha$ и Ca II во временных рядах у 441 FGK-звезды и у нескольких процентов объектов обнаружили антикорреляцию этих линий, что не наблюдается на Солнце. Авторы пришли к выводу, что одни лишь факелы

не могут объяснить наблюдаемое разнообразие отношения этих линий, и предположили, что волокна, имеющие другие соотношения интенсивностей данных линий, могут быть дополнительным фактором, объясняющим полученные наблюдения. С другой стороны, по FGK-карликам, наблюдавшимся на спектрографе HARPS в течение 13 лет, [Gomes da Silva et al. \(2022\)](#) отметили существенную зависимость корреляции этих хромосферных линий от ширины полосы пропускания линии $H\alpha$. Корреляция максимальна при измерении водородной линии с полосой 0.6 Å, но может оказаться даже отрицательной при очень широкой полосе пропускания.

По наблюдениям на телескопах HST, Apache Point и южной обсерватории Gemini [Duvvuri et al. \(2023\)](#) исследовали вневысвещечную изменчивость хромосфер девяти M-карликов. Исследовались бальмеровские линии от $H\alpha$ до H_{10} и линии H и K Ca II. Было найдено, что при минутных экспозициях в течение часа эти линии изменяются в пределах 1–20 %, причем амплитуда вариаций оказалась выше у звезд с большей скоростью вращения. Но в ультрафиолетовых линиях N V, Si IV, C IV, C II и He II отношения S/N были слишком малы для обнаружения стохастических изменений.

[Kumar, Fares \(2023\)](#) исследовали 14-летние наблюдения в спектрах GJ 436 линии H и K Ca II, He I_{D3}, Na I, $H\alpha$, Ca II IRT и обнаружили положительные корреляции переменности H и K Ca II и $H\alpha$ и водорода и гелия, а инфракрасные линии Ca II и $H\alpha$ – отрицательную корреляцию. Анализ показал, что линии H и K Ca II имеют период вариаций около 6.8 года, линии натрия – приблизительно 5.1 года, а линия водорода – около 5.9 года, в то время как фотометрический цикл составляет примерно 7.4 года. Кроме того, обнаружено, что линии H и K Ca II и $H\alpha$ имеют периоды около 40 суток, отождествленные с периодом вращения звезды.

База данных хромосферной активности солнцеподобных звезд на основе спектроскопического обзора низкого разрешения, полученного на телескопе LAMOST, была создана [Zhang et al. \(2022\)](#). По 1 330 654 высококачественным спектрам оценены фотометрические параметры линий H и K Ca II и уровень хромосферной активности S.

[Marvin et al. \(2023\)](#) выполнили абсолютные измерения потоков в линиях H и K Ca II и $H\alpha$ у 110 звезд, спектры которых были получены с помощью спектрографа HARPS, и продлили величины R'_{HK} до M-карликов, сделав их доступными в диапазоне температур от 2300 до 7200 K.

Сильные солнечные вспышки тесно связаны с корональными выбросами массы, которые связываются с выбросами волокон/протуберанцев. С использованием телескопов TESS, NICER и Seimei [Namekata et al. \(2024\)](#) провели 12-суточную многоволновую кампанию наблюдений солнцеподобной звезды EK Dra, имеющей возраст 50–120 миллионов лет. В прежних наблюдениях на звезде были обнаружены смещения в синюю сторону абсорбций линии $H\alpha$, свидетельствовавшие о выбросах волокон. В ходе одновременных оптических и рентгеновских наблюдений EK Dra [Namekata et al. \(2024\)](#) были обнаружены три супервспышки с энергиями от $1.5 \cdot 10^{33}$ до $1.2 \cdot 10^{34}$ эрг, и при этом были открыты два выброса солнечного типа, наблюдавшиеся как эмиссии линии $H\alpha$, смещенные в синюю сторону на 690 и 430 км/с с массами $1.1 \cdot 10^{19}$ и $3.2 \cdot 10^{17}$ г. После первого более мощного события, по-видимому, имело место послевспышечное ослабление рентгеновского излучения до $\sim 10\%$. Распределение энергии в оптическом и рентгеновском диапазонах в наблюдаемых супервспышках согласуется с тем, что имеет место на Солнце, на M-карликах и в тесных двойных системах, и это может быть важно для ранних Венеры, Земли, Марса и молодых экзопланет.

[Bondar', Shlyapnikov \(2024\)](#) проанализировали результаты 30-летних наблюдений по обзорам ASAS, KWS и Hipparcos блеска звезды HD 168443, отметили постоянство ее среднегодовой яркости, определили фотометрический период в 34.7 суток и найденное изменение амплитуды вращательной модуляции связали с развитием активных областей.

[Ikuta, Shibata \(2024\)](#) проанализировали крупное извержение волокон, связанное с одной из описанных выше супервспышек EK Dra. Они обнаружили, что поглощение в $H\alpha$, первоначально показавшее смещение на -510 км/с, со временем уменьшилось. Авторы провели одномерное гидродинамическое моделирование течения вдоль расширяющейся магнитной петли, имитирующее извержение нити в адиабатических и нестационарных условиях, и нашли, что временные изменения линии $H\alpha$ в спектре EK Dra можно объяснить такой моделью с более длительным временем и большими пространственными масштабами, чем выбросы корональной массы (CME) на Солнце.

6 Короны и звездный ветер

Sakaue, Shibata (2021) построили модель нелинейного распространения альвеновских волн и заключили, что эти волны могут играть решающую роль как в нагреве короны, так и в стимулировании звездного ветра. В рамках такого сценария они построили одномерную сжимаемую МГД-модель распространения альвеновских волн для Солнца и М-карликов, охватывающую область от фотосферы до межпланетной среды, включая звездный ветер, и пришли к выводу, что корональная температура М-карликов должна быть ниже, чем у Солнца, скорость ветра больше солнечного, а уносимая масса вещества намного меньше, чем у Солнца.

Используя VLA в диапазоне частот 2–4 ГГц, Suresh et al. (2020) открыли на уровне 29 микроЯн стационарное радиоизлучение ϵ Eri на расстоянии менее 0.2 угловых секунд от звезды. Комбинируя полученные результаты с ранее обнаруженным радиоконтинуумом ϵ Eri, авторы выявили излом спектра на частоте 6 ГГц. Данная эмиссия была приписана оптически толстому тепловому гирорезонансному излучению звездной короны, как предполагалось ранее, для частот ниже 1 ГГц. Крутой спектральный индекс около 2 противоречит его интерпретации как связанному с ветром тепловым излучением. Но приписывая весь наблюдаемый на частотах 2–4 ГГц поток плотности тепловой свободно-свободной эмиссии ветра, они получили строгий верхний предел потери массы звездой $3 \cdot 10^{-11} M_{\odot}$ в год.

По спектрам, полученным на телескопе HST, Wood et al. (2021) исследовали профили поглощения линии $\text{Ly}\alpha$ девяти М-карликов, возникающие при взаимодействии звездного ветра и межзвездной среды. Они оценили темпы потери массы, ограничения на звездные ветры и их зависимость от корональной активности. С учетом прежних данных у 13 из 15 М-карликов звездные ветры оказались слабее или сравнимы с солнечным ветром, но у YZ CMi и GJ 15AB потери массы оказались в 30 и в 10 раз больше соответственно, чем у Солнца. Wood et al. заключили, что не только корональная активность и спектральный тип определяют свойства ветра и, возможно, сильные звездные ветры в значительной мере определяются СМЕ.

Airapetian et al. (2021) развили трехмерную термодинамическую МГД-модель системы звездная корона – ветер и, используя наблюдения в рентгеновском и экстремальном ультрафиолетовом (EUV) диапазонах, а также данные, полученные на космических телескопах HST и TESS, построили модели нагреваемой потоком альвеновских волн короны и ветра молодой звезды κ^1 Cet для двух эпох, разделенных 11 месяцами. Авторы нашли, что за это время глобальная структура магнитного поля короны претерпела перестройку от простого диполя к наклонному и более слабому диполю с развитыми компонентами мультиполя; при этом поток массы в ветре понизился на 40 %.

Kavanagh et al. (2021) выдвинули идею о возбуждении радиоизлучения AU Mic движущейся вокруг нее планетой.

Schmitt et al. (2021) выполнили сопоставление оптической фотометрии и рентгеновских наблюдений молодого быстро вращающегося ротатора AB Dor. Рентгеновские данные были получены с помощью телескопа eROSITA, установленного на борту российско-немецкой космической обсерватории Спектр-Рентген-Гамма, в течение около 20 суток. Постоянное рентгеновское излучение звезды оказалось очень стабильным в течение полутора лет без следов вращательной модуляции. А во время очень мощной оптической вспышки с излучением не менее $4 \cdot 10^{36}$ эрг рентгеновская эмиссия оказалась по крайней мере на порядок величины меньше.

Veronig et al. (2021) отметили, что неожиданные ослабления крайнего ультрафиолета и рентгеновского излучения могут быть связаны с выбросом корональной массы звезды.

Magaudda et al. (2022) из первого рентгеновского обзора eROSITA составили выборку 704 звезд спектральных типов K5-M7 и 501 из них сопоставили с оптическими результатами TESS, что позволило сделать количественные ограничения на зависимость рентгеновской светимости от массы и определить изменения уровня активности относительно объектов до ГП. Авторы определили периоды вращения 180 М-карликов, которые излучают в рентгеновском диапазоне, и оценили уровень насыщения в отношении вращения – активность. Сравнение отношений жесткости и спектров показало, что 65 % этих источников рентгеновского излучения имеют температуру около 0.5 кэВ. Сравнение с результатами 30-летней давности, полученными на спутнике ROSAT, позволило составить представление о долговременной переменности этих источников.

Evensberget et al. (2021) исследовали условия космической погоды в окрестности Солнца в период, когда его возраст составлял 0.6 млрд лет, что соответствует времени появления жизни на Земле. Для этого авторы рассчитали трехмерные модели звездных ветров для пяти молодых солнцеподобных

звезд в скоплении Гиады, возраст которых составляет 0.6 млрд лет, используя их магнитограммы и моделирование ветра, возбуждаемого альвеновскими волнами. Взяты соответствующие фундаментальные параметры этих звезд и два значения абсолютной напряженности магнитных полей, различающиеся пятикратно. Вычисленные значения потерь массы и углового момента в общем согласуются с солнечными данными и различаются между собой больше, чем в эпохи минимума и максимума солнечной активности.

[Шляпников \(2021\)](#) идентифицировал 67 красных карликов с рентгеновскими источниками в поле “Первого света” телескопа eROSITA обсерватории СРГ. Эти звезды были найдены среди 2485 объектов рентгеновского диапазона.

[Pillitteri et al. \(2022\)](#) в течение восьми лет провели на космическом рентгеновском телескопе XMM-Newton 25 наблюдений звезды HD 189733. Они обнаружили повышение средней корональной температуры во время вспышек от 0.4 до 0.9 кэВ при постоянстве потоков и жесткости излучения вне вспышек и нашли степенное распределение вспышек по энергии. Кроме вспышек, нет заметных изменений в потоке и жесткости коронального излучения на шкале в несколько месяцев и годы, что свидетельствует об отсутствии явно выраженных циклов активности на этих масштабах.

[Toriumi, Airapetian \(2022\)](#) проанализировали 10-летние многоволновые наблюдения Солнца как звезды и молодых солнцеподобных звезд, значительно расширили исследования [Pevtsov et al. \(2003\)](#), обнаружившие тесное степенное соотношение между хромосферным переходным диапазоном и дальним корональным ультрафиолетом, крайним ультрафиолетом и потоками рентгеновской эмиссии и общим магнитным беззнаковым потоком. Авторы нашли, что экспоненциальный коэффициент степенного закона наименьший в максимуме активности и возрастает во время солнечного максимума, и заключили, что механизм нагрева атмосферы универсальный у Солнца и солнцеподобных звезд, несмотря на возраст и уровень активности.

[Alvarado-Gómez et al. \(2022\)](#) выполнили трехмерное численное моделирование звездного ветра AU Mic и рассмотрели эволюцию мощного выброса корональной массы с учетом наблюдаемых ограничений на магнитное поле звезды и параметры выброса.

[Fuhrmeister et al. \(2022\)](#) провели одновременные наблюдения Prox Cen в рентгеновском диапазоне с использованием спектрографа LETGS на борту орбитальной обсерватории Chandra и в дальнем ультрафиолетовом диапазоне при помощи спектрографа STIS на борту HST. По 18 оптически тонким линиям в обоих спектральных диапазонах были определены температурная структура и дифференциальная мера эмиссии переходной области и короны во время вспышек. В спокойном состоянии звезды амплитуды вспышек достигали $A_X = 30$ и $A_{FUV} = 20$. Зависимость меры эмиссии была представлена полиномами Чебышева в диапазоне $\lg T$ от 4.25 до 8. Построенные синтетические спектры в диапазоне 1–1700 Å можно рассматривать как репрезентативные для высокоэнергетического облучения Prox Cen b во время вспышек.

[Chen et al. \(2022\)](#) по наблюдениям EV Lac на Chandra исследовали вариации профилей эмиссий в нескольких вспышках и по измерениям линий O VIII, Fe XVII, Mg XII и Si XIV обнаружили движения корональной плазмы со скоростями до 130 км/с и их связь с корональными выбросами, причем скорости восходящих потоков обычно растут с температурой. Переменные отношения линий триплета Si XIII в большинстве вспышек показали увеличение плотности и температуры коронального вещества. [Chen et al.](#) связали эти результаты со взрывным испарением хромосферы во вспышках. В двух последовательных вспышках картина потока плазмы и резкое увеличение плотности наводят на мысль о взрывном испарении при температуре не менее 10 МК.

В октябре 2021 года [Bastian et al. \(2022\)](#) провели на радиотелескопе MeerKAT наблюдения UV Cet в диапазоне частот 886–1686 МГц. Они зарегистрировали вспышку продолжительностью около двух часов с временным разрешением 8 с и разрешением по частоте 0.84 МГц, что позволило рассмотреть динамический спектр, на котором видны три пика и множество широкополосных дуг. Дуги имеют сильную правую круговую поляризацию, а в конце третьего пика возникли короткие всплески со значительной эллиптической поляризацией. Это событие [Bastian et al.](#) интерпретировали моделью с магнитным полем диполя и механизмом излучения, связанным с неустойчивостью циклотронного мазера, а эллиптическая поляризация излучения могла быть результатом отражения от плазменной структуры на некотором расстоянии от источника.

Для удобных расчетов нагрева верхних слоев солнечной и звездных атмосфер [Toriumi et al. \(2022\)](#) составили каталог спектральных индексов отношений излучений в спектральных линиях к поверх-

ностному магнитному потоку, которые являются универсальными для Солнца и солнцеподобных звезд разного возраста и уровня активности.

На аппарате XMM-Newton [Coffaro et al. \(2022\)](#) обнаружили корональные циклы у семи солнцеподобных звезд, среди них ϵ Eri и ι Nor, возраст которых составляет приблизительно 400 и 600 млн лет соответственно, показали самые короткие рентгеновские циклы с самыми маленькими амплитудами. Корона ϵ Eri была промоделирована аналогично солнечным магнитным структурам (активные области, ядра активных областей и вспышки) с различными фллинг-факторами. Исследования показали, что 65%–95% поверхности короны покрыто магнитными структурами, что ответственно за малую амплитуду рентгеновского цикла. Авторы предположили, что основное покрытие поверхности магнитными структурами может быть выше в короне самых молодых звезд. Для проверки этой гипотезы [Coffaro et al.](#) провели анализ рентгеновского излучения солнцеподобной звезды Кеплер-63 возрастом 210 млн лет и с фотосферным циклом 1.27 года – самой молодой звезды, наблюдавшейся в рентгеновском диапазоне с целью обнаружения коронального цикла. По продолжительной кривой блеска они не обнаружили периодических изменений в рентгеновской светимости, хотя возможен фактор 2, и отнесли этот результат за счет 100% покрытия поверхности ядрами активных областей и вспышками. Авторы отметили, что у этих молодых объектов самые короткие длительности циклов и их малые амплитуды.

В течение 26 часов [Rigney et al. \(2022\)](#) провели низкочастотные радионаблюдения на австралийском телескопе ASKAP и у четырех М-карликов обнаружили радиоизлучение в Stokes I с центром на 888 МГц. Два из этих источников были обнаружены также с круговой поляризацией Stokes V. Но при изучении обнаруженных характеристик радиоизлучения авторы не смогли различить модели электронного циклотронного лазера и гиротронного излучения.

Анализируя области локализации источников ТЭВ гамма-излучения в рентгеновском и оптическом диапазонах длин волн, [Шляпников \(2022\)](#) определил угловые расстояния от положений максимумов в распределениях высокоэнергетических потоков до вероятных кандидатов на идентификацию с красными карликами.

[Горбачёв, Шляпников \(2022\)](#) провели поиск периодических изменений блеска и вспышечной активности 110 красных карликов – кандидатов на идентификацию с рентгеновскими источниками eROSITA обсерватории СРГ. При этом у 58 звезд были определены периоды вращения и зафиксированы 233 вспышки.

[Горбунов, Шляпников \(2022\)](#) провели идентификацию в оптическом диапазоне длин волн звезд из каталога CSSTA, которые являются источниками рентгеновского и радиоизлучения. В рентгеновском диапазоне они идентифицировали 2507 звезд и подтвердили 1820 ранее идентифицированных, а в радиодиапазоне – соответственно 36 и 67 звезд.

[Caramazza et al. \(2023\)](#) составили полный список М0–М4-карликов в пределах 10 пс от Солнца и, анализируя эту выборку, получили сведения об общих свойствах М-карликов как источников рентгеновского излучения. Измеренные величины рентгеновского излучения М-карликов сопоставлялись с различными излучающими рентгеновскими структурами на Солнце: корональными дырами, фоновой короной, активными областями и их ядрами. Лишь звезда GJ 745 A не обнаружила рентгеновского излучения в диапазоне чувствительности эксперимента.

Используя данные HST, Chandra, XMM-Newton и обсерватории Swift, [Brown et al. \(2023\)](#) исследовали рентгеновское и ультрафиолетовое излучение К- и М-звезд – родительских объектов экзопланет. На 21 из 23 рассмотренных звезд измерена рентгеновская светимость. Кратковременная вспышечная активность обнаружена у большинства полностью конвективных объектов с $M < 0.35M_{\odot}$, чего нет у более массивных звезд. Средние рентгеновские светимости составили $\sim 5 \cdot 10^{26}$ эрг/с и $\sim 2 \cdot 10^{26}$ эрг/с у частично и полностью конвективных звезд старше 1 млрд лет. Более молодые, полностью конвективные М-карлики имеют светимости от 3 до $6 \cdot 10^{27}$ эрг/с.

[Evensberget et al. \(2023\)](#) отметили, что первоначальный широкий диапазон периодов вращения солнцеподобных звезд сокращается и в основном исчезает к возрасту ~ 0.6 млрд лет, после чего они переходят в режим вращения по Скуманичу. Авторы построили магнитогидродинамические модели ветров 15 молодых звезд солнечного типа с возрастом от 24 до 130 млн лет и с учетом своих предыдущих результатов получили 30 согласованных трехмерных моделей звездных ветров. Модели хорошо охватывают доскуманичевскую фазу замедления звездного вращения, связывая вращение, магнитное поле и возраст. При сравнении различных масштабов магнитного поля каждой звезды

обнаруживается постепенное уменьшение показателя степенной зависимости с увеличением напряженности магнитного поля.

Магнитные процессы, связанные с нетепловым уширением оптически тонких линий с характерной скоростью ~ 23 км/с, несут, по-видимому, достаточно энергии для нагрева короны и ускорения солнечного ветра. [Boro Saikia et al. \(2023\)](#) исследовали, демонстрируют ли нетепловые движения в холодных звездах аналогичную ситуацию. С этой целью по спектрам с HST измерялось избыточное уширение в оптически тонких эмиссионных линиях хромосфер, переходных зон и корон. Оно оказалось коррелировано со скоростью вращения звезды. Авторы заключили, что, как и на Солнце, имеет место нагрев звездных атмосфер альвеновскими волнами, не исключая при этом и нагрева вспышками.

На сферическом пятиметровом радиотелескопе FAST [Zhang et al. \(2023\)](#) исследовали тонкую структуру радиовсплесков AD Leo. За два дня были обнаружены многочисленные радиовсплески с тонкой структурой в виде крупных подвсплесков миллисекундного масштаба. В первый день они имели полоосообразную форму с почти одинаковой частотой частотного дрейфа, а на второй день обнаружили каплеобразную форму, что может быть обусловлено нестабильностью циклотронного мазера.

[Chebly et al. \(2023\)](#) выполнили количественные оценки ветровых свойств холодных звезд ГП. Они промоделировали намагниченные ветры 21 холодной звезды спектральных типов от F до M, используя современный 3D МГД-код, основанный на наблюдаемых крупномасштабных распределениях магнитного поля. [Chebly et al.](#) проанализировали зависимости между спектральным типом, вращением и напряженностью магнитного поля и размером альвеновской поверхности, скоростью потери массы, скоростью потери углового момента, скоростью звездного ветра, зависимость скорости потери массы от числа Россби. Полученные модели охватывают все обитаемые зоны всех звезд выборки, что позволяет оценить динамическое давление звездных ветров на обоих краях ГП.

[Rodríguez et al. \(2023\)](#) зарегистрировали от ϵ Eri непрерывное радиоизлучение на частотах 10 и 33 ГГц, природа которого еще не установлена. Они обнаружили вариации этого излучения на масштабах суток, часов и минут, а 15 апреля 2020 года был зарегистрирован радиоимпульс на частоте 10 ГГц длительностью около 20 минут и амплитудой 4, который они смоделировали излучением ударной волны, врезающейся в звездный ветер.

[Bloot et al. \(2024\)](#) провели радиомониторинг AU Mic в течение более 250 часов на телескопе ASKAP в диапазоне 1.1–3.1 ГГц и обнаружили большое разнообразие радиоизлучения по частотно-временной структуре и по доле поляризованного потока: они выделили пять разных типов всплесков и широкополосную спокойную эмиссию. Радиовсплески сильно циркулярно поляризованы и сопериодичны с вращением звезды, то есть обусловлены пучками лучей и, наиболее вероятно, электронно-циклотронной мазерной нестабильностью. В представленной авторами модели наблюдаемая эмиссия может быть объяснена авроральными кольцами вокруг магнитных полюсов. Полная интенсивность широкополосной эмиссии стохастична, но доля ее круговой поляризации сопериодична вращению звезды и может быть обусловлена гиромангнитной эмиссией с магнитным наклоном по крайней мере в 20° .

[Joseph et al. \(2024\)](#) составили выборку из 256 M-карликов, которые наблюдались одновременно в рентгеновском диапазоне с германского аппарата eROSITA, установленного на борту российской космической обсерватории Спектр-Рентген-Гамма, и в оптическом диапазоне с космического телескопа TESS и характеризуются сравнительной близостью (до 100 пс), быстрым вращением ($P_{\text{rot}} < 9$ суток) и высокой частотой вспышек. Согласно анализу звезд выборки, более быстрые ротаторы обнаружили большую изменчивость и рентгеновские вспышки этих звезд часто совпадают с оптическими вспышками.

7 Вспышки и супервспышки

[Okamoto et al. \(2021\)](#) по большой выборке из 2341 супервспышки на 265 звездах солнечного типа уточнили результаты [Notsu et al. \(2019\)](#): максимальная энергия супервспышек на солнечноподобных звездах составляет $4 \cdot 10^{34}$ эрг, и на Солнце вспышки с энергией $7 \cdot 10^{33}$ и $1 \cdot 10^{34}$ эрг могут происходить раз в 3000 и 6000 лет соответственно. Далее, они связали понижение максимальной энергии вспышек и увеличение периода вращения с возрастом с уменьшением общей площади пятен от 10 до нескольких процентов и нашли, что частоты супервспышек молодых звезд с периодами

вращения в 1–3 суток в сто раз выше, чем у старых медленных ротаторов, но спектральный индекс степенного распределения вспышек по энергиям примерно один и тот же. У рассмотренных звезд с супервспышками не найдены экзопланеты, что означает отсутствие их необходимости для таких мощных вспышек.

По данным обсерватории Kepler [Ilin et al. \(2021b\)](#) исследовали вспышки по 3435 80-суточным кривым блеска 2111 членов открытых скоплений Плеяды, Гиады, Ясли, Рупрехт 147 и М67. В этих скоплениях весьма различных возрастов авторы подтвердили на G–M-звездах 3844 вспышки, распределения которых по энергиям имеют степенный вид со спектральными индексами 1.84–2.39. [Ilin et al.](#) нашли, что вспышечная активность уменьшается от средних M-звезд к G-звездам и от звезд ГП нулевого возраста к звездам солнечного возраста, подтвердили понижение частот вспышек с возрастом и что оно больше у более массивных звезд. Авторы нашли величины массы и скорости вращения, выше которых вспышечная активность перестает быть насыщенной.

По оптическим SDSS-спектрам [Koller et al. \(2021\)](#) провели поиск вспышек и связанных с ними выбросов корональной массы у F–M звезд ГП. Вспышки обнаруживались автоматически по значительным изменениям амплитуд линий $H\alpha$ и $H\beta$ после представления их ядер гауссианой. СМЕ определялись по асимметрии бальмеровских линий, вызванных движением плазмы по лучу зрения. В результате идентифицирована 281 вспышка K3–M9-звезд и 6 кандидатов СМЕ. Энергии вспышек в $H\alpha$ составили $3 \cdot 10^{28}$ – $2 \cdot 10^{33}$ эрг, и они возрастают к более ранним спектральным типам, тогда как доля времен во вспышечном состоянии возрастает к более поздним типам. Оценки масс СМЕ заключены в диапазоне $6 \cdot 10^{16}$ – $6 \cdot 10^{18}$ г и проекции скоростей выбросов составляют 300–700 км/с.

В апреле-июле 2019 года в ходе 40-часового патрулирования Prox Cen в диапазоне от радиоволн до рентгеновского излучения [MacGregor et al. \(2021\)](#) зарегистрировали 1 мая в диапазоне от миллиметровых длин волн до дальнего ультрафиолетового излучения короткую вспышку огромной амплитуды: до 1000 на телескопе ALMA и 14 000 на HST. Эти всплески, записанные с односекундным разрешением, были одновременны, тогда как оптическое излучение, зарегистрированное системой TESS с двухминутным разрешением, имело амплитуду менее 2 и запаздывание относительно упомянутых всплесков около минуты. Вспышка началась как пятисекундный всплеск в миллиметровом и FUV диапазонах, после которого имело место примерно столь же быстрое угасание, так что кривая блеска вспышки была представлена симметричной гауссианой без заметной фазы экспоненциального затухания. Излучение в миллиметровом диапазоне в максимуме всплеска достигло 2.14 ± 0.15 в единицах 10^{14} эрг/с · Гц, при этом произошло изменение спектрального индекса излучения от +2, который соответствует чернотельному излучению спокойной фотосферы, до –2.5, соответствующего синхротрону или гирсинхротрону, а также произошло существенное изменение линейной поляризации излучения. Возможно, это третий случай регистрации синхротрона в звездной вспышке после наблюдений [Beskin et al. \(2017\)](#) и упомянутых выше [MacGregor et al. \(2021\)](#).

В 2019 году на той же аппаратуре был проведен 14-часовой мониторинг Prox Cen, в течение которого была обнаружена ~50 % круговая поляризация эмиссии ([MacGregor et al., 2021](#)). Однако во время упомянутого выше всплеска 1 мая, зарегистрированного в миллиметровом и ультрафиолетовом диапазонах, не было обнаружено никаких событий в микроволновом диапазоне. На следующие сутки микроволновые наблюдения этой звезды поддерживались фотометрически и спектроскопически двумя оптическими телескопами, и за 42 с до начала сильной часовой оптической вспышки с амплитудой более 1.5 и энергией $1.6 \cdot 10^{32}$ эрг был зарегистрирован первый быстрый мощный всплеск когерентного радиоизлучения. Согласно [Zic et al. \(2020\)](#), эта эмиссия по поляризационным и временным характеристикам была аналогична солнечному дециметровому радиоизлучению IV типа, обусловленному потоками ускоренных электронов.

Выше была описана вспышка Prox Cen 1 мая 2019 года, болометрическая энергия которой составила $10^{31.2}$ эрг ([MacGregor et al., 2021](#)). По энергетическому спектру вспышек этой звезды, построенному по наблюдениям системой TESS, такие и более мощные вспышки происходят на ней в оптическом диапазоне в среднем по одной каждые сутки. В спектре вспышки зарегистрированы эмиссии водорода, гелия, натрия и кальция с различными моментами максимумов. Через 510 с после этой вспышки с симметричной кривой блеска произошел новый всплеск меньшей амплитуды, но более длительный и с фазой медленного угасания. Во время обоих всплесков был зарегистрирован сильный континуум в ультрафиолете и в видимом диапазоне. Полученные многоволновые наблюдения вспышки интерпретируются сочетанием чернотельного и синхротронного механизмов излучения.

Jackman et al. (2021) по данным обсерватории Kepler с высоким временным разрешением обнаружили на 403 звездах 4430 вспышек с энергиями до $1.5 \cdot 10^{35}$ эрг. Пятьсот пятнадцать вспышек были найдены вблизи других источников или в двойных системах, и частоты этих вспышек оказались систематически выше у слабых компонентов.

По данным второго года наблюдений TESS Tu et al. (2021) исследовали более 22 500 звезд солнечного типа и на 311 из них обнаружили 1272 супервспышки. Спектральный индекс степенного распределения вспышек по энергиям составил -1.76 ± 0.11 при зависимости длительности супервспышек от энергии как $E^{0.42 \pm 0.01}$, что совпадает с ситуацией в солнечных вспышках. Параметр хромосферной активности S получен на телескопе LAMOST для 7454 звезд и указывает, что Солнце менее активно, чем эти звезды со сверхвспышками. Более горячие звезды выборки вспыхивают реже, чем менее горячие. Вероятно, насыщение энергии супервспышек имеет место на уровне 10^{36} эрг, а в звезде с наиболее энергичной супервспышкой TIC93277807, превышающей этот предел более чем на порядок величины, работает другой механизм.

Недавно по наблюдениям на TESS с двухминутным разрешением Ramsay et al. (2021) у 7 М-карликов обнаружили квазипериодические пульсации вспышек с периодами от 10 до 72 минут и связали эти явления с магнитоакустическими волнами во вспышечных корональных петлях.

В октябре 2019 г. на индийском спутнике AstroSat были зарегистрированы три продолжительные мощные вспышки двойной системы EQ Peg в диапазоне 0.3–7 кэВ (Karmakar et al., 2022). Максимальная светимость вспышек составляла $(5-10) \cdot 10^{30}$ эрг/с, времена возгорания и затухания – до 11 и 24 кс, максимальные температуры вспышек 26, 16 и 17 МК, максимальные меры эмиссии $(4-7) \cdot 10^{53}$ см⁻³, длины корональных петель около $2 \cdot 10^{11}$ см и их плотность – единицы 10^{10} см⁻³ при магнитном поле менее 100 Гс и полной энергии до 10^{34-35} эрг.

Используя Dark Energy Camera, Webb et al. (2021) с помощью оригинальной машиннообучаемой программы исследовали вспышки по кривым блеска с экспозициями в 20 с в полосе g на расстоянии до 500 пс от Солнца в 12 полях с размерами ~ 3 квадратных градуса и нашли 19 914 источников с точными расстояниями по Gaia 2. Авторы отождествили 96 вспышек с энергиями $10^{31}-10^{37}$ эрг на 80 звездах, преимущественно принадлежащих к классу М-карликов, и подтвердили уменьшение доли вспыхивающих М-звезд по мере роста их расстояния от плоскости Галактики. Семьдесят процентов вспышек были короче 8 минут, а средняя плотность вспышек составила $(2.9 \pm 0.3) \cdot 10^{-6}$ вспышки на пс⁻³с⁻¹.

Paudel et al. (2021) сообщили результаты одновременных наблюдений EV Lac, проведенных на пяти обсерваториях. За 25 суток работы TESS было зарегистрировано 56 вспышек на этом инструменте. Дополнительно, за 18 кс наблюдений на обсерватории Swift были обнаружены 3 вспышки в рентгеновском и ультрафиолетовом диапазонах, за 98 кс наблюдений на телескопе NICER – 9 вспышек в ультрафиолетовом диапазоне. Кроме того, были проведены единичные трехчасовые наблюдения с использованием телескопов UN88 и LCOGT. Диапазон энергий вспышек, зарегистрированных на TESS, составил от $10^{30.5}$ до $10^{33.2}$ эрг; вспышек, зарегистрированных на Swift – от $10^{29.3}$ до $10^{31.1}$ эрг; 14 вспышек, зарегистрированных на NICER, – от $10^{30.5}$ до $10^{32.3}$ эрг. У вспышек, зарегистрированных на TESS, обнаружено степенное распределение с показателем -0.67 , но не найдены признаки FIP-эффекта.

Getman, Feigelson (2021) рассмотрели рентгеновские супервспышки звезд до ГП, их энергетику и частоты. Солнцеподобные звезды проявляют самый высокий уровень магнитной активности на ранней конвективной фазе до ГП: пиковая рентгеновская светимость $\lg(L_X) = 30.5 - 34.0$ эрг/с и общая энергетика $\lg(E_X) = 10^{34} - 10^{38}$ эрг. Из более 24 тысяч рентгеновских источников, обнаруженных в ходе предыдущих обзоров, авторы отобрали 1086 молодых – менее 5 млн Согласенлет – объектов из 40 близких областей звездообразования. Большинство этих объектов демонстрируют значительно более мощные оптические и рентгеновские вспышки по сравнению с наблюдаемыми на ГП. Эти события имели место на молодых звездах всех масс, находящихся на различных эволюционных стадиях: от протозвезд до бездисковых звезд. При этом была обнаружена положительная корреляция между частотой вспышек и массой звезды. Характеристики вспышек не зависят от присутствия или отсутствия у звезды диска. Индекс степенного распределения вспышек по энергиям близок к двум, то есть такой же, как у более старых звезд и у Солнца. Мегавспышки с энергией $\lg(E_X) > 36.2$ эрг звезд солнечной массы имеют частоту около двух вспышек на звезду в год и составляют 10–20% всей рентгеновской энергетики PMS-звезд.

[Feinstein et al. \(2022\)](#) проанализировали кривые блеска 161 836 звезд, наблюдавшихся с двухминутными экспозициями на TESS. Разработанная авторами компьютерная программа позволила обнаружить около миллиона вспышек. Звезды ГП с массами более 0.3 солнечной массы обнаружили степенное распределение частот вспышек с показателем около 1.4, характерным для системы с самоорганизованной критичностью; этот показатель несколько меньше у звезд с массами менее 0.3 солнечной массы и около единицы у красных гигантов.

[Lin et al. \(2021a\)](#) показали, что вращение и магнетизм нарушают сферическую симметрию звезд, что накладывает важные наблюдательные ограничения на звездные магнитные поля и на оценку влияния звездной активности на атмосферы экзопланет. Исследователи предложили новый метод оценки локализации вспышек по оптическим кривым блеска, выполнили такие оценки для многих вспышек по данным TESS и предположили, что неоднородное распределение вспышек по долготе необходимо учитывать при оценках обитаемости экзопланет.

[Fuhrmeister et al. \(2022\)](#) провели сравнение результатов рентгеновского обзора неба аппаратом SRG и избыточного свечения в линиях Ca II H и K, измеренного роботом TIGRE. Они обнаружили ожидаемую корреляцию между $\lg(L_X/L_{bol})$ и $\lg(R'_{HK})$, которая улучшается при отборе квазисовременных наблюдений. Авторы считают, что циклические изменения на длительных временных интервалах важнее, чем корреляции краткосрочных вариаций типа вращательных модуляций или вспышек.

[Bondar' et al. \(2021\)](#) сообщили об обнаружении оптических вспышек на избранных G–M-карликах по наблюдениям в 2000–2020 годы: у 11 звезд найдены малоамплитудные события с $\Delta V < 0.25^m$, у BE Cet и двух M-карликов – всплески до половины звездной величины.

На скоростном спектрографе ULTRASPEC, установленном на 2.4-метровом Национальном телескопе Таиланда, [Doyle et al. \(2022\)](#) зарегистрировали на YZ CMi с субсекундным разрешением две вспышки с энергией около 10^{34} эрг. Комбинация вейвлет-анализа, преобразования Фурье и разложение по эмпирическим модам выявили квазипериодические пульсации и удвоение периода колебаний. В обоих событиях(?) обнаружилось квазипериодическое колебание в несколько минут и отсутствие таких колебаний на более высоких частотах. Эти особенности интерпретируются авторами как динамика резонансных магнитогидродинамических волн в корональных петлях длиной в 0.2–0.7 радиуса звезды, что согласуется с ситуацией на Солнце.

[Pietras et al. \(2022\)](#) провели статистику звездных вспышек по трехлетним наблюдениям системой TESS (секторы 1–39) с двухминутными экспозициями. С помощью разработанной ими программы автоматического поиска вспышек и факелов по кривым блеска они рассмотрели 330 000 звезд и обнаружили более 25 000 звезд со вспышечной активностью с общим числом вспышек более 140 000 с энергиями в диапазоне 10^{31} – 10^{36} эрг; то есть большинство зарегистрированных событий – это супервспышки. Около 7.7% рассмотренных объектов являются вспыхивающими звездами, но среди M-карликов эта доля достигает 50%. Максимум в распределении вспышек по длительности приходится на 50 минут, среднее время возгорания – менее 10 минут, самые продолжительные вспышки длились несколько часов. Вторичные пики кривых блеска авторы отнесли за счет нагрева фотосферы нетепловыми электронами. Максимумы в распределении вспышек по размерам по разным оценкам составляли 0.2–0.3% поверхности звезд. Спектральный индекс в распределении вспышек по энергиям по разным оценкам составил 1.7 и 1.5. По энергетике и длительности вспышек получены оценки напряженности магнитного поля от 10 до 200 Гс и длины вспышечных корональных петель от 10^{10} до $2 \cdot 10^{11}$ см.

По наблюдениям на TESS [Yamashita et al. \(2022\)](#) рассмотрели кривые блеска 33 звезд нулевого возраста в молодых звездных скоплениях IC 2391 и IC 2602, оценили их амплитуды блеска от $0^m.001$ до $0^m.145$, как и у молодых звезд в скоплении Плеяды. Авторы обнаружили филлинг-факторы пятен в диапазоне от 0.1 до 21%, а также сильную эмиссию Ca II, характерную для звезд с супервспышками и превышающую эмиссию Солнца на два порядка величины. На 12 звездах этих скоплений с насыщенными излучениями хромосфер [Yamashita et al.](#) обнаружили 21 вспышку с энергиями 10^{33} – 10^{35} эрг.

Концепция о решающей зависимости уровня активности звезды солнечного типа от степени ее запятненности недавно была развита в работе [Katsova et al. \(2022b\)](#). Авторы обнаружили, что частота слабых рентгеновских вспышек на Солнце практически не зависит от степени его запятненности, тогда как частота мощных вспышек классов M и X существенно зависит от этой величины. Поскольку филлинг-фактор пятен даже самого активного Солнца не превышает малой доли процента его

поверхности, а на самых активных карликах он достигает десятков процентов, то становится понятным и отсутствие супервспышек на Солнце, и их появление на активных звездах. [Katsova et al.](#) оценили напряженность магнитных полей в звездных пятнах, которая составила порядка 2 кГс и максимальную энергию звездных супервспышек, которая достигает $(1 - 3) \cdot 10^{36}$ эрг.

[Namekata et al. \(2022\)](#) представили результаты спектроскопических и фотометрических наблюдений, выполненных с помощью телескопа *Seimei* и *TESS*, которые зафиксировали продолжительную супервспышку на молодой (50–120 млн лет) солнцеподобной звезде EK Dra: энергия вспышки составила $2.6 \cdot 10^{34}$ эрг, ее длительность – 2.2 часа, что позволяет классифицировать данное событие как самую мощную супервспышку на солнцеподобной звезде, открытую оптической спектроскопией. Профиль линии $H\alpha$ не показал ни заметной асимметрии, которая наблюдалась в предыдущих исследованиях, ни уширения линии, но продолжительность свечения линии $H\alpha$ оказалась сопоставима с длительностью белой вспышки, что нетипично для M-карликов.

[Lin et al. \(2022\)](#) провели в апреле 2020 года 27-часовой фотометрический мониторинг метровым и полуметровым телескопами близкого к Солнцу M6.5-карлика Wolf 359 и зарегистрировали при этом 13 вспышек с энергией от $5 \cdot 10^{29}$ до 10^{33} эрг. Самая сильная из вспышек была зарегистрирована обоими разнесенными на 300 км телескопами и имела амплитуду 1.6.

С помощью камеры *Tomo-e Gozen*, установленной на телескопе *Kiso Schmidt* Токийского университета, [Aizawa et al. \(2022\)](#) провели за 40 часов наблюдений односекундный обзор вспышек M-карликов. Обнаружено 22 вспышки M3–M5-карликов со временами нарастания от 5 до 100 с и с амплитудами от 0.5 до 20. Эти кривые блеска показали более крутой подъем и более плавный спуск, чем минутные кривые блеска, полученные обсерваторией *Kepler*, как правило, плоский максимум. Полагая свечение вспышки как абсолютно черное тело с температурами 9000–15000 К, [Aizawa et al.](#) нашли пиковые светимости 10^{29} – 10^{31} эрг/с и болометрические энергии 10^{31} – 10^{34} эрг. Девяносто процентов родительских звезд обнаружили по спектрам телескопа *LAMOST* эмиссию линии $H\alpha$, и средняя частота вспышек этих звезд составила 0.7 событий в сутки. Авторы высказали предположение, что наблюдаемые кривые блеска можно объяснить с помощью модели сжатия в хромосфере: время возрастания в целом согласуется с альвеновским временем прохождения магнитной петли масштабом 10^4 км и напряженностью поля 1000 Гс, в то время как затухание определяется радиационным охлаждением сжатой хромосферы.

По одновременным рентгеновским (*Chandra*) и ультрафиолетовым (*HST/STIS*) наблюдениям [Fuhrmeister et al. \(2022\)](#) исследовали температурную структуру короны и переходной области звезды *Prox Cen* и влияние этого излучения звезды на расположенную в ее обитаемой зоне экзопланету земного типа. Дифференциальное распределение мер эмиссии было построено для вспышек и спокойного состояния звезды, амплитуды потоков во вспышке составляли 4–20 в ультрафиолетовом диапазоне и до 30 в рентгеновском.

С помощью *HST/COS* [Feinstein et al. \(2022\)](#) более пяти часов вели наблюдения звезды *AU Mic*, возраст которой составляет 22 млн лет. В ее пылевом диске находятся две экзопланеты, так что система идеальна для выяснения результатов облучения этих тел далеким ультрафиолетом, исходящим от звезды из слоя 10^4 – 10^7 К. Авторы обнаружили 13 вспышек с энергиями в диапазоне 10^{29} – 10^{31} эрг при амплитуде в континууме $\lambda < 1100$ Å и оценили потерю массы звездой 10^8 г/с.

По архивным наблюдениям в 2015–2016 годы на телескопах *ALMA* (12 м) и *ACA* (1.33 мм) [Burton et al. \(2022\)](#) впервые обнаружили на ϵ Eri три сильные вспышки в миллиметровом диапазоне длин волн. Самая сильная вспышка продолжалась около часа и имела в максимуме 28 ± 7 мЯн, что в 50 раз ярче, чем в спокойном состоянии звезды и в 10 раз ярче солнечных вспышек в том же диапазоне длин волн. Найден спектральный индекс в максимуме вспышки 1.81 и нижний предел линейной поляризации 0.08 ± 0.12 .

[Katsova et al. \(2022b\)](#) показали, что при корректном учете различных технологий наблюдений солнечных и звездных вспышек различия в максимальных энергиях этих событий заметно уменьшаются, и солнечные вспышки и супервспышки на солнцеподобных звездах можно описать единой моделью зависимости активности от запятненности.

[Howard et al. \(2022\)](#) сообщили о наблюдении в ходе многоволновой кампании уникальной вспышки *Prox Cen* 6 мая 2019 года. Наблюдения проводились в миллиметровом, оптическом и мягком рентгеновском диапазонах. Эта вспышка оказалась слабой зарегистрированной звездной вспышкой. Ее энергия в рентгеновском диапазоне составила 10^{30} эрг, в оптическом диапазоне – 10^{28} эрг, корональная температура составила 11 МК, и мера эмиссии – 10^{50} см⁻³. Миллиметровая светимость

вспышки была более чем в сто раз выше, чем у солнечной вспышки класса X1, и ее продолжительность составила секунды, а не минуты, как у вспышек на Солнце.

[Althukair, Tsiklauri \(2023a\)](#) предложили и использовали программу на Python для автоматического обнаружения вспышек и поиска супервспышек на A–M-звездах главной последовательности во всех данных обсерватории Kepler, существенно расширив предыдущие исследования только G-звезд, основанные лишь на части данных с Kepler. Авторы изучили статистические свойства частоты возникновения супервспышек и нашли, что на G-звездах вспышки с энергией 10^{35} эрг происходят раз в 4360 лет. Обнаружено 4637 супервспышек на 1896 G-карликах, 321, 1125, 4538 и 5445 супервспышек на 136, 522, 770 и 312 карликах A, F, K и M соответственно. Частота возникновения супервспышек имеет степенную форму зависимости от энергии с показателем степени от 2.0 до 2.1 у всех спектральных типов от F до M, но 1.3 у A-звезд. Затем авторы привели случаи супервспышек на медленно вращающихся солнцеподобных звездах, супервспышек с большими амплитудами на G- и K-звездах GP и пришли к выводу, что медленное затухание вспышек соответствует малым энергиям вспышек, а быстрое – большим энергиям ([Althukair, Tsiklauri, 2023b](#)). В следующей работе они рассмотрели F- и G-звезды с периодами вращения менее суток и обсудили вопрос, сколь реальны циклы от 5.13 до 8.14 суток, которые следует ожидать по полученным корреляциям для таких коротких периодов вращения ([Althukair, Tsiklauri, 2023c](#)).

[Jackman et al. \(2023\)](#) использовали оптические наблюдения на TESS и ультрафиолетовые наблюдения на GALEX вспышек на M-карликах для оценки энергии ультрафиолетового излучения, исходящего от вспышек, зарегистрированных в оптическом диапазоне. В результате авторы обнаружили, что модель чернотельного излучения вспышки при температуре 9000 K, широко использовавшаяся для предсказания ультрафиолетового излучения по оптическим наблюдениям, недооценивала энергию в ближнем ультрафиолетовом диапазоне (NUV) GALEX в 6.5 раз и энергию в дальнем ультрафиолетовом диапазоне (FUV) GALEX в 31 раз. Они нашли температуру вспышек у полностью конвективных M-звезд равной 10 700 K и оценили роль уточненного ультрафиолетового потока в биогенезе экзопланет.

В той же координированной кампании [Jackman \(2022\)](#) исследовал двойную M-звезду Ross 733 в оптическом диапазоне и в области NUV на GALEX и в ультрафиолетовом диапазоне на Swift и на последнем получил кривые блеска двух вспышек. По его оценке, в системе происходят вспышки с энергией 10^{33} эрг каждые полторы суток. [Jackman](#) оценил температуру псевдоконтинуума на спаде вспышек величиной 7340 K.

[Brasseur et al. \(2023\)](#) исследовали вспышки на G-звездах в ближнем ультрафиолетовом и оптическом диапазонах, наблюдения проводились на инструментах GALEX и Kepler соответственно. Отсутствие оптических вспышек во время таких событий в ультрафиолетовом диапазоне накладывает верхний предел отношению излучений в этих полосах и ставит под сомнение оценки ультрафиолетового облучения экзопланет по оптическим наблюдениям вспышек звезд.

Используя данные индийского космического аппарата AstroSat, [Kuznetsov et al. \(2023\)](#) провели наблюдения в рентгеновском и ультрафиолетовом диапазонах двойной системы AT Mic, состоящей из двух M4.5e-карликов. В течение 20 кс авторы обнаружили спокойное излучение системы и не менее пяти вспышек на разных компонентах. Вспышки в рентгеновском диапазоне имели большую продолжительность и задерживались на 5–6 минут относительно вспышек в ультрафиолетовом диапазоне. Анализ полученных данных привел к выводу о существовании мультитермальной короны с температурами в диапазоне 7–15 МК и ME $(2.9 - 4.5) \cdot 10^{52} \text{ см}^{-3}$. Обилие тяжелых элементов в короне AT Mic в 3–5 раз ниже, чем в солнечной фотосфере, и увеличивалось во время вспышек, вероятно, за счет испарения хромосферы. Вспышки имели энергии $\sim 10^{31-32}$ эрг и магнитные поля сильнее, чем в типичных солнечных вспышках.

С помощью космического телескопа CoRoT [Rabello Soares et al. \(2022\)](#) на 69 K-звездах зарегистрировали 209 вспышек и оценили их чернотельные температуры 6400 ± 2800 K, а их энергии от 10^{32} до 10^{37} эрг. На холодном M-карлике Trappist-1 с семью экзопланетами [Maas et al. \(2022\)](#) зарегистрировали две вспышки в полосах g, r, i, z. Чернотельные температуры вспышек составили 7940 и 6000 K, пиковые температуры достигали 13 620 и 8290 K.

[Stelzer et al. \(2022b\)](#) описали мощную вспышку AD Leo 19 ноября 2019 года, которая наблюдалась в рентгеновском и оптическом диапазонах. Энергия в диапазоне 0.2–12 кэВ составила $1.3 \cdot 10^{33}$ эрг, болометрическая – $5.6 \cdot 10^{33}$ эрг. Поток протонов составлял не менее $10^5 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ стер}^{-1}$. Спектроскопия

высокого разрешения по времени обнаружила эволюцию температуры и меры эмиссии, увеличение электронной плотности и содержания элементов, оценку длины корональной петли до $4 \cdot 10^9$ см.

Vasilyev et al. (2022) предложили уточненный метод отождествления вспышек на материалах панорамной фотометрии, позволяющий отсеять изображения, искаженные излучением фоновых источников: на первом этапе определяется характер рассеяния точки в системе и на втором этапе уточняются координаты изображения повышенной яркости. Авторы применили этот метод к 5862 звездам ГП, и число заподозренных вспышек уменьшилось с 2274 до 342.

See et al. (2023) обнаружили, что вспышки сильнее у более богатых металлами звезд при фиксированной массе и периоде вращения.

Tristan et al. (2023) провели семидневную многоволновую кампанию мониторинга молодой активной M1e-звезды AU Mic с экзопланетами и пылевым диском. В диапазоне длин волн от рентгеновского до оптического зарегистрировано 73 вспышки. Данные по NUV (GALEX) и с XMM-Newton используются для эмпирического исследования эффекта Нойперта. Шестидесять пять процентов вспышек не показывают этот эффект, а там, где он есть, предложено четыре его версии.

Liu et al. (2023) провели статистическое исследование 125 вспыхивающих звезд, обнаруженных в ходе первых двух лет наблюдений, начиная с 2020 года, с использованием минутных экспозиций, полученных на телескопах LAMOST и TMTS. Большинство этих объектов – звезды поздних спектральных типов с $G_{BP} > G_{RP} > 2.0^m$, но более голубые объекты обнаруживают вспышки большей энергии более широкого профиля. Максимальный поток во вспышке очень зависит от ее эквивалентной продолжительности, что согласуется с результатами, полученными по данным Kepler и Evgусоре, и напоминает свечение магнитных петель. Вспышки на более горячих звездах обнаруживают более сильную зависимость максимального потока от эквивалентной продолжительности вспышки. В спектрах вспыхивающих звезд, полученных на телескопе LAMOST, эмиссия линии H α сильнее, чем у неактивных звезд, но, как считают авторы, хромосферная активность может быть не единственной причиной эмиссии.

Boyd et al. (2023) провели фотометрические и спектроскопические наблюдения EV Lac и в 10 сеансах из 39 зарегистрировали вспышки с амплитудой более $0^m.1$. Анализ полученных данных привел их к следующим выводам. Энергия вспышек в полосе В составляет от $10^{30.8}$ до $10^{32.6}$ эрг, максимум излучения в континууме достигался раньше, чем в эмиссионных линиях водорода и гелия, а затухание излучения в континууме происходит быстрее, чем в линиях. В среднем 37% энергии в полосе В приходится на линии. Чернотельные температуры самых ярких вспышек составили 10590 и 19500 К. В максимуме блеска обнаружилось синее смещение.

Tu et al. (2021) предложили и рассчитали ряд одномерных гидродинамических моделей вторичных пиков на кривых блеска оптических вспышек M-карликов: их причиной авторы считают свободно-свободное и свободно-связанное излучение конденсаций в петлях корональной плазмы.

Didel et al. (2024) зарегистрировали с помощью XMM-Newton 21 рентгеновскую вспышку AB Dor и 13 из них детально проанализировали. Амплитуды вспышек достигали $A_x = 34$, диапазон энергий варьировался от 10^{34} до 10^{36} эрг, длительности составляли от 0.7 до 5.8 часов. Зарегистрированные спектры в спокойном состоянии представлены трехтемпературной плазмой со средними температурами 0.29, 0.95 и 1.9 кэВ. Пиковая температура определена в пределах 31–89 МК, пиковая $ME = 10^{52.5} - 10^{54.7}$ см $^{-3}$. Имел место обратный FIP-эффект. Рентгеновские кривые блеска звезды демонстрировали вращательную модуляцию, длины полупетель определены в пределах $10^{9.9} - 10^{10.7}$ см и минимальное магнитное поле – в 200–700 Гс.

Namizaki et al. (2023) на телескопах Seimei и TESS провели одновременные спектроскопические и фотометрические наблюдения супервспышки YZ CMi. Болетрическая энергия вспышки составила $1.3 \cdot 10^{34}$ эрг, в линии H α – $3.0 \cdot 10^{32}$ эрг. Эмиссия в этой линии обнаружила красную асимметрию на протяжении всей вспышки длительностью 4.6–5.1 часа до 200–500 км/с.

На аппарате NICER в 2019 году Hamaguchi et al. (2023) провели на близлежащей молодой солнцеподобной звезде κ^1 Cet наблюдения двух мощных рентгеновских вспышек, эквивалентных супервспышкам. Обе вспышки были зарегистрированы от самого начала возгорания до начала затухания, что позволило детально спектрально изучить фазу их возгорания. Первая вспышка разгоралась 800 с, вторая – в несколько раз дольше. В обеих вспышках в жестком диапазоне 2–4 кэВ кривые блеска показали типичный для звездных вспышек быстрый подъем и медленное затухание, тогда как в мягком диапазоне 0.3–1 кэВ, особенно в первой вспышке, имели место протяженные плоские пики. Спектры вспышек с разрешением по времени требовали двухтемпературную плазму: оба

компонента изменялись сходным образом, но холодный отставал примерно на 200 с и имел в 4–6 раз меньшую меру эмиссии по сравнению с горячим. Сравнение с гидродинамическими расчетами корональных петель показало, что холодный компонент возникает в рентгеновской плазме вблизи основания магнитных петель, которые охлаждаются в основном теплопроводностью. Временное запаздывание соответствует времени прохождения испаренного газа через всю вспыхивающую петлю. Меньшая мера эмиссии холодного компонента по сравнению с расчетами наводит на мысль о подавлении теплопроводности возможным увеличением поперечного сечения петли или флуктуациями турбулентности.

Исследования показали, что длительность солнечных и звездных вспышек коррелирует с интенсивностью события на некоторых длинах волн, таких как белый свет, но не в мягком рентгеновском диапазоне, и причины этого различия оставались неизвестны. В работе Hamaguchi et al. (2023) использована программа радиативной гидродинамики для выяснения факторов, влияющих на длительность вспыхивающей эмиссии на разных длинах волн. Оказалось, что длительность зависит от температуры плазмы, высоты атмосферы, относительной влажности радиативного охлаждения, теплопроводности, изменения энтальпии. Были найдены явные различия между эмиссией, формирующей нижнюю атмосферу и непосредственно отвечающей за нагрев, и эмиссией, которая формируется в короне, косвенно отвечая за индуцированный нагрев хромосферного испарения. Полученные результаты Hamaguchi et al. применили к энергетике вспышек.

По данным TESS Kumbhakar et al. (2023) у молодого коричневого карлика МНО 4 (спектральный класс M7.0) в области звездообразования в Тельце определили период вращения 2.224 суток и зарегистрировали две супервспышки с болометрической энергией 10^{34} – 10^{35} эрг.

По данным телескопа AstroSat Sairam et al. (2023) исследовали внешние атмосферы четырех быстро вращающихся звезд AB Dor, BO Mic, DG CVn и GJ 3331 и на первых трех из них зарегистрировали вспышки в рентгеновском диапазоне и на двух – в ультрафиолетовом диапазоне.

Notsu et al. (2024) провели одновременные оптические спектроскопические и фотометрические наблюдения звезд YZ CMi, EV Lac и AD Leo в течение 31 ночи. Семь из 41 зарегистрированной вспышки показали синюю асимметрию в профиле линии H α величиной от –73 до –122 км/с и продолжительностью от 20 минут до 2.5 часов. На одной из вспышек зарегистрирован переход синей асимметрии в красную. Одна из вспышек наблюдалась также в мягком рентгене, что позволило оценить напряженность магнитного поля и длину корональной петли. Полагая, что уже синяя асимметрия связана с выбросом протуберанца, авторы оценили его массу в 10^{15} – 10^{19} г, что находится между массой вспышки и солнечным CME.

Используя данные обсерватории Chandra и каталога Gaia DR3, Zhao et al. (2024) провели статистический анализ вспышек солнцеподобных звезд в мягком рентгеновском диапазоне. Выборка из 129 вспышек на 103 звездах обнаружила события с энергией от 10^{33} до 10^{37} эрг; длительности этих событий отличаются от длительности оптических вспышек, но показатель степенного распределения такой же: –1.77.

Karmakar et al. (2023) зарегистрировали на обсерватории AstroSat пять рентгеновских и ультрафиолетовых вспышек на SS Eri и AB Dor. Пиковые рентгеновские светимости находились в пределах 10^{31} – 10^{33} эрг/с. Спектральный анализ указывал на наличие трех- и четырехтемпературной короны у SS Eri и AB Dor соответственно. Максимальные температуры составляли 51–59 МК у SS Eri и 29–44 МК у AB Dor, а меры эмиссии 10^{54} и 10^{55} см $^{-3}$ соответственно. Отмечено повышенное содержание металлов во время вспышек.

Inoue et al. (2024) провели четыре ночи наблюдений EV Lac с использованием пяти различных инструментов, охватывающих диапазоны мягкого рентгеновского излучения, ближнего ультрафиолета, оптического диапазона с фотометрической и спектроскопической аппаратурой и обнаружили вспышку с болометрической энергией $3.4 \cdot 10^{32}$ эрг. Примерно через час после пика вспышки в профиле H α появился избыточный компонент, смещенный примерно на 100 км/с в синюю сторону. Авторы интерпретируют это как запоздалый протуберанец. Соотношение потоков в ближнем ультрафиолете и в белом свете соответствует чернотельной температуре < 9000 К или максимальному потоку энергии пучка нетепловых электронов менее $5 \cdot 10^{11}$ эрг/см 2 с.

Следует напомнить, что о чернотельном излучении звездных вспышек в предыдущие годы уже писали MacGregor et al. (2021), Rabello Soares et al. (2022), Maas et al. (2022), Jackman et al. (2023), Boyd et al. (2023) и лишь последние авторы приводят температуру одной из вспышек 19 500 К, тогда как у другой вспышки получено значение 10 500 К; остальные исследователи приводят оценки

температур около 10000 К. Однако, используя оригинальный колориметрический подход, еще в начале 2010-х годов [Ловкая \(2014\)](#) уверенно показала, что звездные вспышки излучают чернотельно только вблизи максимума блеска и при этом их температуры близки к 20000 К. К сожалению, все работы автора были опубликованы на русском языке и остались неизвестны иностранным коллегам. Недавно новые аргументы против широкого применения чернотельной модели излучения звездных вспышек были приведены [Simões et al. \(2024\)](#).

8 Магнитные поля

Магнитометрия звезд – наиболее сложная область наземной экспериментальной астрофизики, и число центров, где проводятся такие наблюдения, единицы. Но в последние годы были проведены довольно многочисленные магнитометрические наблюдения звезд с активностью солнечного типа и опубликованы важные результаты таких наблюдений и теоретических разработок по звездному магнетизму.

[Kochukhov et al. \(2020\)](#) провели магнитометрию звезд солнечного типа с помощью измерения усиления спектральных линий магнитным полем. Этот метод отличается от наиболее распространенной магнитометрии по спектрополяриметрическим наблюдениям тем, что в нем измеряется суммарный магнитный поток по модулям локальных компонентов поля, тогда как спектрополяриметрические сигналы разных знаков взаимно гасаются, что при многочисленности малых магнитных структур приводит к недооценке величины V_f . Для преодоления же основной трудности магнитометрии по усилению спектральных линий – разделения на обычных спектрах магнитных и немагнитных механизмов расширения линий – [Kochukhov et al.](#) развили методику использования спектральных линий с разными факторами Ланде и выполнили магнитометрию 14 G-карликов и одного K-карлика разного возраста и с разными уровнями активности по трем линиям одного мультиплета нейтрального железа в области 5500 Å. В результате они нашли, что величины V_f уменьшаются от 1.3–2.0 кГс в звездах моложе 120 миллионов лет до 0.2–0.8 кГс у более старых звезд. Они обнаружили антикорреляцию среднего поля и периода вращения или числа Россби и дали калибровку $V_f(Ro)$. [Kochukhov et al.](#) пришли к выводу, что все рассмотренные звезды имеют поля с напряженностью $B \approx 3.2$ кГс, а рост величины V_f обусловлен увеличением фллинг-фактора от 10% до 50% поверхности звезды с ростом активности. Исследованные ими звезды обнаружили четкую корреляцию среднего магнитного поля с индексами корональной и хромосферной активности L_X/L_{bol} и $\lg R'_{HK}$ соответственно. При сравнении полученных данных с результатами спектрополяриметрической магнитометрии авторы оценили, что последняя дает около 1% общей энергии магнитного поля у самых активных звезд и около 0.01% у наименее активных. Напомним, что ранее [Johns-Krull, Valenti \(1996\)](#) провели магнитометрию по уширению спектральной линии нейтрального железа одного из самых активных красных карликов EV Lac.

[Reiners et al. \(2022\)](#) представили измерения усредненных по поверхности магнитных полей 292 M-карликов, полученные более чем по 15000 спектрам высокого разрешения. Авторы обнаружили связь между средней напряженностью поля и числом Россби, напоминающую зависимость вращение-активность, и нашли, что среди медленно вращающихся звезд магнитный поток пропорционален периоду вращения, а среди быстрых ротаторов среднее поверхностное поле незначительно превышает уровень, установленный доступной кинетической энергией. Далее, [Reiners et al.](#) нашли тесную связь между нетепловым корональным рентгеновским излучением, хромосферным излучением в линиях водорода и кальция и магнитным потоком. Эти соотношения, взятые вместе, показывают, что соотношение вращение-активность можно проследить до зависимости магнитного поля от вращения. Кальциевая эмиссия насыщается при средней напряженности поля 800 Гс, тогда как линия $H\alpha$ и рентгеновское излучение растут с более сильными полями у более быстрых ротаторов.

Практически общепринято, что вспышки и корональные выбросы массы на Солнце и на звездах черпают энергию из запасенной в корональных магнитных полях, где они генерируются механизмами динамо. Но остается открытым вопрос о том, происходит ли снабжение магнитного поля энергией непосредственно или передающими токами. В связи с этим [Seligman et al. \(2022\)](#) рассмотрели распределения интенсивностей в выборке около 10^5 вспышек звезд ГП, зарегистрированных TESS и показавших степенное распределение как на Солнце, хотя с разными показателями. Авторы исследовали механизмы, требуемые для степенного распределения вспышек через прямую энергию токов, расширили модель, включив силы Кориолиса, что существенно для более быстрых ротато-

ров, и привели предварительные соображения для предсказанной корреляции вращение–степенной индекс.

[Brown et al. \(2022\)](#) представили измерения звездной хромосферной активности R'_{HK} и/или усредненного по поверхности продольного магнитного поля B_l у 954 звезд от среднего спектрального типа F до среднего типа M, полученные из спектрополяриметрических наблюдений, и обнаружили положительную корреляцию между логарифмами этих величин. Они объединили свои результаты с архивными данными по хромосферной активности и наблюдениями крупномасштабной геометрии магнитного поля по зееман-доплеровской визуализации. Хромосферная активность, изменчивость активности и напряженность тороидального поля уменьшаются на ГП по мере замедления вращения. У G-звезд исчезновение доминирующих тороидальных полей происходит при том же уровне хромосферной активности, что и изменение соотношений между хромосферной активностью, изменчивостью активности и средней напряженностью поля.

[Kochukhov et al. \(2023\)](#) разработали процедуру диагностики магнитного поля, основанную на магнитном усилении линий атомов железа в оптическом диапазоне, расширив ее от измерения одного среднего значения напряженности поля до одновременной реконструкции доплеровских изображений двумерных карт температуры и напряженности магнитного поля. Они применили этот новый метод к двум эпохам спектроскопических данных молодой солнцеподобной звезды LQ Hydra. В обе эпохи авторы обнаружили равномерное распределение напряженности магнитного поля, за исключением широтного тренда увеличения напряженности от 1.5–2.0 кГс на низких широтах до 3.0–3.5 кГс вблизи полюсов вращения. Такое распределение мелкомасштабного поля не обнаруживает четкой корреляции с расположением температурных пятен или глобальной структурой магнитного поля.

В 2019–2022 гг. на канадско-французско-гавайском телескопе [Lehmann et al. \(2024\)](#) провели наблюдения шести медленно вращающихся M-карликов средних подклассов с периодами вращения от 40 до 190 суток. По многочисленным циркулярно поляризованным спектрам каждой звезды они подтвердили величины периодов и исследовали двумя методами крупномасштабную топологию магнитного поля. Все исследованные звезды показали крупномасштабные изменения магнитных полей на временной шкале их периодов вращения, смену магнитной полярности GJ 1151 и, возможно, GJ 905. Четыре полностью конвективных M-карлика обнаружили большее число временных вариаций, чем два частично конвективных. Все шесть M-карликов продемонстрировали крупномасштабную напряженность поля от 20 до 200 Гс, как у значительно более быстрых ротаторов.

В ту же кампанию [Donati et al. \(2023a\)](#) провели исследование в ближнем ИК-диапазоне крупно- и мелкомасштабного магнитного поля и экзопланет молодого M-карлика AU Mic. Обе сигнатуры поля модулируются вращением звезды с периодом 4.86 суток. Мелкомасштабное поле оценивается по уширению спектральных линий и достигает 2.51 кГс. Крупномасштабное поле, полученное с помощью зееман-доплеровских изображений, в основном является полоидальным и осесимметричным со средней интенсивностью 550 Гс. Обнаружены сигнатуры радиальных скоростей экзопланет b и c, что позволило оценить их массы в 10 и 14 масс Земли.

[Donati et al. \(2023b\)](#) исследовали магнитные поля и вращения 43 слабо- и умеренно-активных M-карликов по наблюдениям в 2019–2022 гг. на спектрополяриметре SPIRou, установленном на канадско-французско-гавайском телескопе. Авторы использовали 6700 спектров с круговой поляризацией для исследования продольного магнитного поля и обнаружили поле на 40 звездах и надежные или предварительные периоды вращения на 38 звездах. Найденные периоды у ранних M-карликов составляют от 14 до 60 суток и более, у большинства средних и поздних M-карликов – от 70 до 200 суток. [Donati et al. \(2023b\)](#) нашли, что напряженность обнаруженных крупномасштабных полей не уменьшается с увеличением периода или числа Россби у медленно вращающихся карликов выборки, как это происходит у более массивных и более активных звезд.

Из той же команды [Donati et al. \(2023a\)](#) получили среднюю напряженность магнитного поля от 0.05 до 1.15 кГс и нашли, что включение магнитного поля в модели атмосфер практически не влияет на их параметры. Далее, они нашли, что мелкомасштабные магнитные поля составляют более 70% общего среднего магнитного поля и не нашли четких доказательств того, что среднее поле уменьшается с увеличением числа Россби. Полученные результаты позволяют предполагать, что динамо-процессы могут протекать в нетрадиционном режиме в этих сильно магнитных медленно вращающихся звездах.

[Bellotti et al. \(2023\)](#) поставили задачу отследить изменения крупномасштабного магнитного поля AD Leo, которые показали бы вековую эволюцию из прошлых спектрополяриметрических кампаний.

Использовались наблюдения звезды в ближнем ИК-диапазоне со SPIRou в 2019–2020 гг. и архивные оптические данные, полученные на двух специализированных спектрополяриметрах, расположенных на Гавайях и в Верхнем Провансе в 2006–2019 гг., неполяризованные профили Стокса и другие источники. В результате авторы обнаружили свидетельства долговременной эволюции магнитного поля, характеризующейся уменьшением осевой симметрии, которое сопровождалось ослаблением продольного поля от 300 до 50 Гс и соответствующим увеличением беззнакового магнитного поля от 2.8 до 3.6 кГс. Крупномасштабное магнитное поле AD Leo проявило первые намеки на смену полярности в конце 2020 года в виде значительного увеличения наклона диполя, при этом топология оставалась преимущественно полоидальной и дипольной. Это означает, что маломассивные М-карлики с преобладающим дипольным магнитным полем могут подвергаться магнитным циклам.

Bai et al. (2023) провели 146-часовой фотометрический мониторинг AD Leo на телескопе GWAC-F30 и 528 часов патрулирования ее блеска на TESS; при этом были зарегистрированы 9 и 70 вспышек соответственно. Параметры вспышек – их длительности, амплитуды и энергии, найденные в этом исследовании, – в основном согласуются с более ранними результатами, что свидетельствует о существенном постоянстве активности на протяжении десятилетий. На фазе затухания самой мощной вспышки обнаружена пульсация с периодом 26 минут.

В выборке из 16 солнцеподобных звезд Hahlin et al. (2023) проанализировали зеемановское уширение шести магниточувствительных и нечувствительных линий нейтрального железа в инфракрасной полосе H для измерения мелкомасштабных магнитных полей, используя моделирование переноса поляризованного излучения и отклонения от нелокального термодинамического равновесия. В результате авторы нашли среднюю напряженность магнитного поля в диапазоне от 0.4 до < 0.1 кГс, а также выявили корреляцию между мелкомасштабными и крупномасштабными магнитными полями. При сравнении NIR и оптических измерений обнаружилось превышение оптических результатов в 2–3 раза.

Amazo-Gómez et al. (2023) провели многоволновую кампанию по зондированию магнетизма молодой солнцеподобной звезды ι Hor от фотосферы до короны. Они представили результаты многолетнего спектрополяриметрического мониторинга с помощью сверхстабильного прибора HARPS на 3.6-метровом телескопе ESO, высокоточные данные с TESS, наблюдения в ближнем и дальнем ультрафиолете на HST. В результате авторы надежно определили период вращения звезды. Анализируя градиент спектра мощности кривых блеска TESS, Amazo-Gómez et al. смогли оценить отношение чисел пятен и факелов и пришли к выводу, что во время наблюдений на звездной поверхности преобладали пятна. Было впервые проведено сравнение свойств фотосферной активности, полученной методом GPS и методом Зеемана – Доплера, а усиление линий C IV и C III по спектрам, полученным на HST, было интерпретировано как свидетельство вспышки.

С целью выяснения взаимодействия двойственности и магнетизма в тесных двойных системах Tsvetkova et al. (2024) рассмотрели двойную систему FK Aqr, состоящую из двух ранних М-карликов и уже известную как вспыхивающая и имеющая компоненты с массами чуть выше полностью конвективной структуры. Авторы использовали спектрополяриметрические наблюдения на канадско-французско-гавайском телескопе для извлечения средних линий Стокса I и V. Продольные магнитные поля и показатели хромосферной активности измерялись по профилям средних линий LSD. Вращательная модуляция профилей Стокса V использовалась для реконструкции структуры магнитного поля обеих звезд.

Bhatia et al. (2024) рассмотрели некоторые вопросы работающей в зоне конвекции небольшой динамо-машины – так называемого магнитного ковра – в качестве альтернативы теории среднего поля. Они исследовали распределение этих полей и их влияние на характеристики интенсивности, скорости и пространственное распределение кинетической и магнитной энергии в нижней фотосфере звезд спектральных типов F3V, G2V, K0V и M0V с использованием трехмерного радиационного излучения. Напряженности поля на поверхности $\tau = 1$ во всех случаях весьма схожи. Звезда M0V показала самые сильные поля, а звезда F3V – самое сильное давление газа. Все звезды показали избыток горизонтального поля по отношению к вертикальному полю средней фотосферы, и этот избыток растет к поздним спектральным типам. Эти поля приводят к уменьшению скорости восходящего потока и к небольшому уменьшению размеров гранул.

Brown et al. (2024) проанализировали возможное влияние экзопланеты на вариации магнитного поля молодой солнцеподобной звезды V889 Her. По картам магнитного поля в 14 эпох за период с 2004 по 2019 гг. обнаружено, что магнитное поле звезды меняется с 3–4-летними вариациями

от слабого и простого во время минимумов активности хромосферы до сильного и сложного во время максимумов активности; при этом постоянно существует полярное пятно с более слабыми и недолговечными пятнами на более низких широтах. Авторы показали, что есть определенная вероятность существования планет с массами одной и двух масс Юпитера у этой звезды и других молодых солнцеподобных звезд с высокой активностью.

9 Цикличность и эволюция активности

[Katsova \(2020\)](#) опубликовала краткий обзор наблюдательных результатов, лежащих в основе современных идей по эволюции звездной активности. Основные законы, полученные из соотношений вращение–возраст и активность–вращение, позволяют проследить изменения с возрастом активности звезд малых масс во время нахождения звезды на ГП и сопоставить свойства активности звезд и молодого Солнца. Совместно рассматриваются различные индикаторы активности, вращения и магнитных полей солнцеподобных звезд разного возраста, определяются периоды вращения, когда режим насыщенной активности сменяется режимом ненасыщенной активности, что для активности солнечного типа у G- и K-звезд имеет место при 1.1 и 3.3 суток. Это соответствует возрастам 0.2–0.6 млрд лет, когда на молодом Солнце устанавливаются регулярные циклы пятен. Обсуждаются свойства корональной и хромосферной активности на молодом Солнце. Оценки EUV показывают, что далекий ультрафиолет на молодом Солнце был в 7 раз выше современного уровня и вдвое выше, чем во время установления цикличности активности, а вероятный темп потери массы составлял $10^{-12} M_{\odot}$ в год. Приводятся оценки максимальной энергии вспышек $5 \cdot 10^{34}$ эрг и напряженности магнитного поля. В целом эволюция активности следует поведению углового момента звезды, а после 100–250 млн лет магнитные поля тесно коррелируют с вращением.

[Luhn et al. \(2022\)](#) исследовали звезду HD 166 620, которая несколько старше и менее активна, чем Солнце. В рамках HR-проекта по наблюдениям линий Ca II для этой звезды был уверенно определен цикл активности в 17 лет, а по данным наблюдений, проведенных в 2020-х годах на телескопе Keck, переменность не наблюдалась, что позволило отнести звезду к кандидатам в состояние минимума типа Маундера.

[Bondar, Katsova \(2022\)](#) исследовали циклическую переменность солнечного аналога VE Ceti с возрастом 0.6 млрд лет и периодом вращения 7.655 суток. По фотометрическим данным за 1977–2019 годы они обнаружили единственный цикл активности в 6.76 лет с амплитудой $0^{m}.02$. Кратковременные вариации блеска за счет вращательной модуляции происходят с увеличением амплитуды до $0^{m}.05$ вблизи минимума цикла.

Увеличив оптические ряды до превышения 50 лет, собрав рентгеновские данные и данные по инфракрасному триплету кальция, [Fuhrmeister et al. \(2023\)](#) подтвердили ранее известный трехлетний цикл активности молодой вспыхивающей звезды ϵ Eri, уточнили 11-летний цикл и заподозрили существование 34-летнего цикла.

Согласно [Metcalf et al. \(2024\)](#), постоянно низкий уровень активности старой солнцеподобной звезды 51 Peg приводит к предположению, что она может испытывать большой магнитный минимум либо может быть связана с началом ослабленного магнитного торможения, при котором достаточно медленное вращение нарушает циклическую активность, и производство крупномасштабных магнитных полей звездным динамо. Авторы оценили магнитное эволюционное состояние звезды, ее ветровой тормозной момент, который явно помещает ее в режим, обусловленный изменениями скорости потери массы.

10 Экзопланеты

Анализируя наблюдения на TESS четырех мощных и продолжительных вспышек на полностью конвективных карликах, по модуляции блеска этих звезд, вызванной их быстрым вращением, [Pill et al. \(2021a\)](#) оценили широты вспышек в диапазоне от 55° до 81° , что, по мнению авторов, делает несущественным влияние такой звездной активности на экзопланеты.

[Stelzer et al. \(2022a\)](#) рассмотрели 112 M-карликов ярче $11^{m}.5$, для которых космический телескоп TESS способен исследовать всю обитаемую зону. Располагая 1276 кривыми блеска с двухминутными экспозициями, авторы зарегистрировали более 2500 вспышек и, используя известное соотношение

между излучением вспышек в оптическом и рентгеновском диапазонах, оценили потоки энергии на экзопланеты в обоих указанных спектральных диапазонах. [Stelzer et al.](#) изучили зависимость вспышек от вращения, амплитуды от длительности и распределение частот вспышек по энергии, то есть их энергетический спектр. Но только у 12 звезд были найдены периоды вращения.

[Klein et al. \(2022\)](#) проанализировали годичный мониторинг звезды AU Mic и ее экзопланеты спектрографом HARPS и определили полуамплитуды лучевых скоростей AU Mic b и c, которые составили 5.8 ± 2.5 м/с и 8.5 ± 2.5 м/с соответственно. Для AU Mic с выполнено независимое измерение полуамплитуды лучевой скорости с одновременным учетом наведенной активностью дисторсии и обусловленными планетой сдвигами. Результатом является полуамплитуда величиной 13.3 ± 4.1 м/с, что говорит о высокой центральной плотности AU Mic c. Кроме того, обнаружено увеличение фллинг-фактора пятен и снижение уровня дифференциального вращения, что свидетельствует о заметных изменениях уровня магнитной активности звезды в течение года. Также авторы сообщили об обнаружении на уровне 3σ модуляции гелиевого дублета на 8.33 ± 0.04 сутках, что близко к орбитальному периоду AU Mic b, равному 8.46 суток.

[Loyd et al. \(2023\)](#) провели всесторонний анализ M2.5-карлика GJ 436, вращающегося с периодом 44 суток, и обращающейся вокруг него экзопланеты типа горячего Нептуна с массой 25 масс Земли, размером 4.1 радиуса Земли и периодом обращения 2.6 суток. Наблюдения охватывают три эпохи в период с 2012 по 2018 гг., они перекрыли почти полный цикл активности, два оборота звезды и два орбитальных периода планеты. При этом были обнаружены многочисленные короткие вспышки. Цикл активности звезды в 7.75 ± 0.10 года дал вариации в суммарном потоке основных эмиссионных линий FUV $38 \pm 3\%$; это нижнее значение эффекта вспышек, так как самые слабые вспышки не регистрируются из-за ограниченной чувствительности прибора, а самые сильные – из-за их редкости. Максимальная амплитуда $A_{\text{FUV}} = 25$. Незначительное увеличение излучения в диапазоне FUV с фазой орбиты соответствует магнитному полю планеты менее 100 Гс.

[Krolkowski et al. \(2024\)](#) детально рассмотрели интенсивность и переменность чувствительного к активности звезды триплета гелия $\lambda 10830 \text{ \AA}$ для оценок характеристик экзосфер у экзопланет молодых звезд. Исследование выполнено по временным рядам спектров молодых звезд, имеющих транзитные экзопланеты. Авторы пришли к выводу о повышенной плотности молодых хромосфер и о заселении метастабильного уровня гелия в результате столкновений. Вспышки и изменения характеристик поверхности звезд приводят к изменению свечения триплета гелия, максимальная переменность имеет место у самых молодых звезд и ослабевает после 300 млн лет.

[Pillitteri et al. \(2023\)](#) сравнили рентгеновское излучение активных F5-звезд KELT-24 и WASH-18 с горячими юпитерами. Звезда KELT-24 имеет двухкомпонентную корону с температурами 0.36 и 0.98 кэВ, на ней зарегистрирована вспышка длительностью 2 кс, во время которой корональная температура поднялась до 3.5 кэВ, и ее рентгеновская светимость находится на уровне, типичном для одновозрастных F-звезд в скоплении Гиады. На WASH-18 зарегистрированы лишь небольшие оптические мерцания, похожие на вспышки. Столь низкий уровень активности этой звезды может быть обусловлен тем, что WASH-18 b могла препятствовать формированию короны с мощным рентгеновским излучением либо звезда вошла в период минимальной активности, аналогичный минимуму Маундера.

[Pineda, Villadsen \(2023\)](#) зарегистрировали от медленно вращающегося M-карлика YZ Cet когерентные радиовсплески на частоте 2–4 ГГц. Звезда имеет компактную систему планет земной группы, ближайшая к ней экзопланета обращается с двухдневным периодом. Два когерентных всплеска произошли на одинаковых орбитальных фазах YZ Cet b, что указывает на повышенную вероятность индуцирования звездного излучения экзопланетой.

[Shlyapnikov \(2024b\)](#) сравнил периоды вращения 689 звезд нижней части ГП и орбитальные периоды экзопланет вокруг них и нашел значимую корреляцию периодов.

По данным, полученным на TESS, [Горбачёв \(2023\)](#) проанализировал вспыхивающую активность 1518 звезд и на 60 из них обнаружил 471 вспышку с энергиями от 10^{30} до 10^{36} эрг. Анализ зависимости активности от гравитационного потенциала экзопланет привел к выводу о возможном влиянии планет на вспышки у звезд.

11 Заключение

Перечисленные выше результаты столь многообразны и затрагивают звездную активность со столь разных сторон, что невозможно выделить среди них главный. Но можно высказать некоторые соображения по части организации дальнейших исследований звезд с активностью солнечного типа.

Удивительно, но методика, использованная Герцшпрунгом при открытии вспыхивающих красных карликов около ста лет назад, и подходы, применяемые современными исследователями, по своей сути являются одинаковыми – это панорамная фотометрия. Несмотря на то что Герцшпрунг использовал 10-дюймовый телескоп, расположенный в Южной Африке, а сегодня подобные исследования проводятся с помощью космических обсерваторий, таких как Kepler и TESS, фундаментальный принцип остается неизменным. Разница заключается лишь в техническом прогрессе, достигнутом за прошедшее столетие. Значит, начинающему исследователю надо не только исполнять конкретные поручения своего руководителя, но и интересоваться историей вопроса.

Наиболее перспективны одновременные наблюдения в разных диапазонах длин волн спектра. Следовательно, важно принимать участие в кампаниях с широкой кооперацией наблюдателей на качественно различной аппаратуре.

Исследователи звезд с активностью солнечного типа должны быть хорошо знакомы с явлениями и теориями событий солнечной активности, и термин “звездно-солнечная физика” должен наполняться реальным содержанием и работать в обоих направлениях: исследования Солнца дают исходный материал для понимания процессов на звездах, а изучение звезд разных возрастов – единственная возможность для восстановления истории Солнца.

Составление этого обзора было бы невозможно без регулярно присылаемых М.М. Кацовой публикаций arXiv, за что я ей глубоко благодарен. Выражаю признательность А.А. Шляпникову, Я.В. Поклад и М.А. Смирновой за разностороннюю помощь при выполнении этой работы.

Литература

- Алексеев И., Гершберг Р., 2021. *Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв.* Т. 117. № 1. С. 44–47. [Alekseev I., Gershberg R., 2021. *Izv. Krymsk. Astrofiz. Observ.*, vol. 117, no. 1, pp. 44–47. (In Russ.)].
- Алексеев И., Кожевникова А., 2017. *Астрон. журн.* Т. 94. № 3. С. 240. [Alekseev I.Yu., Kozhevnikova A.V., 2017. *Astron. zhurn.*, vol. 94, no. 3, p. 240. (In Russ.)].
- Алексеев И., Кожевникова А., 2018. *Астрон. журн.* Т. 95. № 6. С. 421. [Alekseev I.Yu., Kozhevnikova A.V., 2018. *Astron. zhurn.*, vol. 95, no. 6, p. 421. (In Russ.)].
- Гершберг Р., Клиорин Н., Пустильник Л., Шляпников А., 2020. *Физика звезд средних и малых масс с активностью солнечного типа.* М.: Физматлит. [Gershberg R.E., Kleeorin N.I., Pustil'nik L.A., Shlyapnikov A.A., 2020. *Physics of mid- and low-mass stars with solar-type activity.* M.: Fizmatlit. (In Russ.)].
- Горбачёв М., 2023. Труды конференции “Солнечная и солнечно-земная физика – 2023”, ГАО РАН. С. 67–70. [Gorbachev M.A. 2023. *Proceedings of the conference “Solar and Solar-Terrestrial Physics – 2023”*, GAO RAN, pp. 67–70. (In Russ.)].
- Горбачёв М., Шляпников А., 2022. Труды конференции “Солнечная и солнечно-земная физика – 2022”, ГАО РАН. С. 65–68. [Gorbachev M.A., Shlyapnikov A.A., 2022. *Proceedings of the conference “Solar and Solar-Terrestrial Physics – 2022”*, GAO RAN, pp. 65–68. (In Russ.)].
- Горбунов М., Шляпников А., 2022. Труды конференции “Солнечная и солнечно-земная физика – 2022”, ГАО РАН. С. 69–72. [Gorbunov M.A., Shlyapnikov A.A., 2022. *Proceedings of the conference “Solar and Solar-Terrestrial Physics – 2022”*, GAO RAN, pp. 69–72. (In Russ.)].
- Кацова М., 1990. *Астрон. журн.* Т. 67. С. 1219. [Katsova M.M., 1990. *Astron. zhurn.*, vol. 67, p. 1219. (In Russ.)].
- Коваль А., Окс Е., 1983. *Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв.* Т. 67. С. 90. [Koval' A.N., Oks E.A., 1983. *Izv. Krymsk. Astrofiz. Observ.*, vol. 67, p. 90. (In Russ.)].
- Ловкая М., 2014. *UBVRI-фотометрия и колориметрия вспышек звезд типа UV Cet (Дис. канд. физ.-матем. наук).* Научный. [Lovkaya M.N., 2014. *UBVRI photometry and colorimetry of flares on UV Cet-type stars*, PhD thesis. Nauchnyi. (In Russ.)].
- Окс Е., 1981. Труды международной конференции “Год солнечного максимума”. Т. 1. С. 200. [Oks E.A., 1981. *Proceedings of the international conference “Year of Solar Maximum”*, vol. 1, p. 200. (In Russ.)].

- Шляпников А., 2021. Труды конференции “Солнечная и солнечно-земная физика – 2021”, ГАО РАН. С. 321–324. [Shlyapnikov A.A., 2021. Proceedings of the conference “Solar and Solar-Terrestrial Physics – 2022”, GAO RAN, pp. 321–324. (In Russ.)].
- Шляпников А., 2022. Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. Т. 118. № 3. С. 5–18. [Shlyapnikov A.A., 2022. Izv. Krymsk. Astrofiz. Observ., vol. 118, no. 3, pp. 5–18. (In Russ.)].
- Airapetian V.S., Jin M., Lüftinger T., et al., 2021. *Astrophys. J.*, vol. 916, no. 2, p. 96.
- Aizawa M., Kawana K., Kashiya K., et al., 2022. *Publications of the ASJ*, vol. 74, no. 5, pp. 1069–1094.
- Althukair A.K., Tsiklauri D., 2023a. *Research in Astronomy and Astrophysics*, vol. 23, no. 8, p. 085017.
- Althukair A.K., Tsiklauri D., 2023b. *Research in Astronomy and Astrophysics*, vol. 23, no. 10, p. 105010.
- Althukair A.K., Tsiklauri D., 2023c. *Research in Astronomy and Astrophysics*, vol. 23, no. 11, p. 115015.
- Alvarado-Gómez J.D., Cohen O., Drake J.J., et al., 2022. *Astrophys. J.*, vol. 928, no. 2, p. 147.
- Amazo-Gómez E.M., Alvarado-Gómez J.D., Poppenhäger K., et al., 2023. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, vol. 524, no. 4, pp. 5725–5748.
- Araújo A., Valio A., 2023. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, vol. 522, no. 1, pp. L16–L20.
- Bai J.Y., Wang J., Li H.L., et al., 2023. *Publ. Astron. Soc. Pacific*, vol. 135, no. 1048, p. 064201.
- Bastian T.S., Cotton W.D., Hallinan G., 2022. *Astrophys. J.*, vol. 935, no. 2, p. 99.
- Bellotti S., Morin J., Lehmann L.T., et al., 2023. *Astron. Astrophys.*, vol. 676, p. A56.
- Beskin G., Karpov S., Plokhotnichenko V., Stepanov A., Tsap Y., 2017. *Publ. Astron. Soc. Australia*, vol. 34, p. e010.
- Bhatia T., Cameron R., Peter H., Solanki S., 2024. *Astron. Astrophys.*, vol. 681, p. A32.
- Bicz K., Falewicz R., Pietras M., Siarkowski M., Preś P., 2022. *Astrophys. J.*, vol. 935, no. 2, p. 102.
- Bloot S., Callingham J.R., Vedantham H.K., et al., 2024. *Astron. Astrophys.*, vol. 682, p. A170.
- Bondar’ N.I., Katsova M.M., Shlyapnikov A.A., 2021. *Geomagnetism and Aeronomy*, vol. 61, no. 7, pp. 1069–1074.
- Bondar N.I., Katsova M.M., 2022. *Geomagnetism and Aeronomy*, vol. 62, no. 7, pp. 919–923.
- Bondar’ N.I., Shlyapnikov A.A., 2024. *Geomagnetism and Aeronomy*, vol. 63, no. 8, pp. 1277–1284.
- Boro Saikia S., Lueftinger T., Airapetian V.S., et al., 2023. *Astrophys. J.*, vol. 950, no. 2, p. 124.
- Boyd D., Buchheim R., Curry S., et al., 2023. *J. Amer. Assoc. Var. Star Observ.*, vol. 51, no. 1, p. 14.
- Boyle A.W., Bouma L.G., 2023. *Astron. J.*, vol. 166, no. 1, p. 14.
- Brasseur C.E., Osten R.A., Tristan I.I., Kowalski A.F., 2023. *Astrophys. J.*, vol. 944, no. 1, p. 5.
- Brown E.L., Jeffers S.V., Marsden S.C., et al., 2022. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, vol. 514, no. 3, pp. 4300–4319.
- Brown A., Schneider P.C., France K., et al., 2023. *Astron. J.*, vol. 165, no. 5, p. 195.
- Brown E.L., Marsden S.C., Jeffers S.V., et al., 2024. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, vol. 528, no. 3, pp. 4092–4114.
- Burton K., MacGregor M.A., Osten R.A., 2022. *Astrophys. J. Lett.*, vol. 939, no. 1, p. L6.
- Cao L., Pinsonneault M.H., 2022. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, vol. 517, no. 2, pp. 2165–2189.
- Caramazza M., Stelzer B., Magaudda E., et al., 2023. *Astron. Astrophys.*, vol. 676, p. A14.
- Carmona A., Delfosse X., Bellotti S., et al., 2023. *Astron. Astrophys.*, vol. 674, p. A110.
- Chahal D., de Grijs R., Kamath D., Chen X., 2022. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, vol. 514, no. 4, pp. 4932–4943.
- Chebly J.J., Alvarado-Gómez J.D., Poppenhäger K., Garraffo C., 2023. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, vol. 524, no. 4, pp. 5060–5079.
- Chen H., Tian H., Li H., et al., 2022. *Astrophys. J.*, vol. 933, no. 1, p. 92.
- Coffaro M., Stelzer B., Orlando S., 2022. *Astron. Astrophys.*, vol. 661, p. A79.
- Di Maio C., Petralia A., Micela G., et al., 2024. *Astron. Astrophys.*, vol. 683, p. A239.
- Di Mauro M.P., Reda R., Mathur S., et al., 2022. *Astrophys. J.*, vol. 940, no. 1, p. 93.
- Didel S., Pandey J.C., Srivastava A.K., Singh G., 2024. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, vol. 527, no. 2, pp. 1705–1721.
- Distefano E., Lanzafame A.C., Brugaletta E., et al., 2023. *Astron. Astrophys.*, vol. 674, p. A20.
- Donati J.F., Cristofari P.I., Finociety B., et al., 2023a. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, vol. 525, no. 1, pp. 455–475.
- Donati J.F., Lehmann L.T., Cristofari P.I., et al., 2023b. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, vol. 525, no. 2, pp. 2015–2039.

- Doyle J.G., Irawati P., Kolotkov D.Y., et al., 2022. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, vol. 514, no. 4, pp. 5178–5182.
- Duvvuri G.M., Pineda J.S., Berta-Thompson Z.K., France K., Youngblood A., 2023. *Astron. J.*, vol. 165, no. 1, p. 12.
- Engle S.G., 2024. *Astrophys. J.*, vol. 960, no. 1, p. 62.
- Evensberget D., Carter B.D., Marsden S.C., Brookshaw L., Folsom C.P., 2021. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, vol. 506, no. 2, pp. 2309–2335.
- Evensberget D., Marsden S.C., Carter B.D., et al., 2023. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, vol. 524, no. 2, pp. 2042–2063.
- Feinstein A.D., Seligman D.Z., Günther M.N., Adams F.C., 2022. *Astrophys. J. Lett.*, vol. 925, no. 1, p. L9.
- Flagg L., Johns-Krull C.M., France K., et al., 2022. *Astrophys. J.*, vol. 934, no. 1, p. 8.
- Fuhrmeister B., Czesla S., Robrade J., et al., 2022. *Astron. Astrophys.*, vol. 661, p. A24.
- Fuhrmeister B., Coffaro M., Stelzer B., et al., 2023. *Astron. Astrophys.*, vol. 672, p. A149.
- Gershberg R., Kleeorin N., Pustilnik L., Airapetian V., Shlyapnikov A., 2024. Physics of mid- and low-mass stars with solar-type activity and their impact on exoplanetary environments. Simferopol': "Forma".
- Getman K.V., Feigelson E.D., 2021. *Astrophys. J.*, vol. 916, no. 1, p. 32.
- Gomes da Silva J., Bensabat A., Monteiro T., Santos N.C., 2022. *Astron. Astrophys.*, vol. 668, p. A174.
- Hahlin A., Kochukhov O., Rains A.D., et al., 2023. *Astron. Astrophys.*, vol. 675, p. A91.
- Hamaguchi K., Reep J.W., Airapetian V., et al., 2023. *Astrophys. J.*, vol. 944, no. 2, p. 163.
- Hertzsprung E., 1924. *Bull. Astron. Inst. Netherlands*, vol. 2, p. 84.
- Howard W.S., MacGregor M.A., Osten R., et al., 2022. *Astrophys. J.*, vol. 938, no. 2, p. 103.
- Ikuta K., Namekata K., Notsu Y., et al., 2023. *Astrophys. J.*, vol. 948, no. 1, p. 64.
- Ikuta K., Shibata K., 2024. *Astrophys. J.*, vol. 963, no. 1, 50.
- Ilin E., Poppenhaeger K., Schmidt S.J., et al., 2021a. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, vol. 507, no. 2, pp. 1723–1745.
- Ilin E., Schmidt S.J., Poppenhäger K., et al., 2021b. *Astron. Astrophys.*, vol. 645, p. A42.
- Ilin E., Poppenhaeger K., 2022. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, vol. 513, no. 3, pp. 4579–4586.
- Inoue S., Enoto T., Namekata K., et al., 2024. *Publications of the ASJ*, vol. 76, no. 2, pp. 175–190.
- Ioannidis P., Schmitt J.H.M.M., 2020. *Astron. Astrophys.*, vol. 644, p. A26.
- Jackman J.A.G., 2022. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, vol. 517, no. 3, pp. 3832–3837.
- Jackman J.A.G., Shkolnik E., Loyd R.O.P., 2021. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, vol. 502, no. 2, pp. 2033–2042.
- Jackman J.A.G., Shkolnik E.L., Million C., et al., 2023. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, vol. 519, no. 3, pp. 3564–3583.
- Johns-Krull C.M., Valenti J.A., 1996. *Astrophys. J. Lett.*, vol. 459, p. L95.
- Johnson L.J., Norris C.M., Unruh Y.C., et al., 2021. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, vol. 504, no. 4, pp. 4751–4767.
- Joseph W.M., Stelzer B., Magaudda E., Vičánek Martínez T., 2024. *arXiv e-prints*, p. arXiv:2401.17287.
- Karmakar S., Naik S., Pandey J.C., Savanov I.S., 2022. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, vol. 509, no. 3, pp. 3247–3257.
- Karmakar S., Pandey J.C., Rawat N., Singh G., Shedge R., 2023. *arXiv e-prints*, p. arXiv:2401.00117.
- Katsova M.M., 2020. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, vol. 211, p. 105456.
- Katsova M.M., Nizamov B.A., Shlyapnikov A.A., 2022a. *Geomagnetism and Aeronomy*, vol. 62, no. 7, pp. 903–910.
- Katsova M.M., Obridko V.N., Sokoloff D.D., Livshits I.M., 2022b. *Astrophys. J.*, vol. 936, no. 1, p. 49.
- Kavanagh R.D., Vidotto A.A., Klein B., et al., 2021. In Wolk S.J., Dupree A.K., Gunther H.M. (Eds), *The 20.5th Cambridge Workshop on Cool Stars, Stellar Systems, and the Sun (CS20.5)*. Cambridge Workshop on Cool Stars, Stellar Systems, and the Sun, p. 315, doi:10.5281/zenodo.4728000 (arXiv:2104.14457).
- Kitchatinov L., 2022. *Research in Astronomy and Astrophysics*, vol. 22, no. 12, p. 125006.
- Klein B., Zicher N., Kavanagh R.D., et al., 2022. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, vol. 512, no. 4, pp. 5067–5084.
- Kochukhov O., Hackman T., Lehtinen J.J., Wehrhahn A., 2020. *Astron. Astrophys.*, vol. 635, p. A142.

- Kochukhov O., Hackman T., Lehtinen J.J., 2023. *Astron. Astrophys.*, vol. 680, p. L17.
- Koller F., Leitzinger M., Temmer M., et al., 2021. *Astron. Astrophys.*, vol. 646, p. A34.
- Kovari Z., Strassmeier K.G., Kriskovics L., et al., 2024. *Astron. Astrophys.*, vol. 684, p. A94.
- Krolikowski D.M., Kraus A.L., Tofflemire B.M., et al., 2024. *Astron. J.*, vol. 167, no. 2, p. 79.
- Kumar M., Fares R., 2023. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, vol. 518, no. 2, pp. 3147–3163.
- Kumbhakar R., Mondal S., Ghosh S., Ram D., Pramanik S., 2023. *arXiv e-prints*, p. arXiv:2309.01084.
- Kuznetsov A.A., Karakotov R.R., Chandrashekhar K., Banerjee D., 2023. *Research in Astronomy and Astrophysics*, vol. 23, no. 1, p. 015006.
- La Fauci G., Rodono M., 1983. In Byrne P.B., Rodono M. (Eds), *IAU Colloq. 71: Activity in Red-Dwarf Stars. Astrophysics and Space Science Library*, vol. 102, pp. 185–188, doi:10.1007/978-94-009-7157-8_20.
- Lanzafame A.C., Brugaletta E., Frémat Y., et al., 2023. *Astron. Astrophys.*, vol. 674, p. A30.
- Lehmann L.T., Donati J.F., Fouqué P., et al., 2024. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, vol. 527, no. 2, pp. 4330–4352.
- Leitzinger M., Odert P., Heinzel P., 2022. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, vol. 513, no. 4, pp. 6058–6073.
- Lin H.T., Chen W.P., Liu J., et al., 2022. *Astron. J.*, vol. 163, no. 4, p. 164.
- Liu Q., Lin J., Wang X., et al., 2023. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, vol. 523, no. 2, pp. 2193–2208.
- Lloyd R.O.P., Schneider P.C., Jackman J.A.G., et al., 2023. *Astron. J.*, vol. 165, no. 4, p. 146.
- Lu Y.L., Curtis J.L., Angus R., David T.J., Hattori S., 2022. *Astron. J.*, vol. 164, no. 6, p. 251.
- Luhn J.K., Wright J.T., Henry G.W., Saar S.H., Baum A.C., 2022. *Astrophys. J. Lett.*, vol. 936, no. 2, p. L23.
- Maas A.J., Ilin E., Oshagh M., et al., 2022. *Astron. Astrophys.*, vol. 668, p. A111.
- MacGregor M.A., Weinberger A.J., Lloyd R.O.P., et al., 2021. *Astrophys. J. Lett.*, vol. 911, no. 2, p. L25.
- Magaudda E., Stelzer B., Raetz S., et al., 2022. *Astron. Astrophys.*, vol. 661, p. A29.
- Martin D.V., Sethi R., Armitage T., et al., 2024. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, vol. 528, no. 1, pp. 963–975.
- Marvin C.J., Reiners A., Anglada-Escudé G., Jeffers S.V., Boro Saikia S., 2023. *Astron. Astrophys.*, vol. 671, p. A162.
- Medina A.A., Winters J.G., Irwin J.M., Charbonneau D., 2022. *Astrophys. J.*, vol. 935, no. 2, p. 104.
- Metcalf T.S., Finley A.J., Kochukhov O., et al., 2022. *Astrophys. J. Lett.*, vol. 933, no. 1, p. L17.
- Metcalf T.S., Strassmeier K.G., Ilyin I.V., et al., 2023. *Astrophys. J. Lett.*, vol. 948, no. 1, p. L6.
- Metcalf T.S., Strassmeier K.G., Ilyin I.V., et al., 2024. *Astrophys. J. Lett.*, vol. 960, no. 1, p. L6.
- Meunier N., Kretschmar M., Gravet R., Mignon L., Delfosse X., 2022. *Astron. Astrophys.*, vol. 658, p. A57.
- Mittag M., Schmitt J.H.M.M., Schröder K.P., 2023. *Astron. Astrophys.*, vol. 674, p. A116.
- Monsch K., Drake J.J., Garraffo C., Picogna G., Ercolano B., 2023. *Astrophys. J.*, vol. 959, no. 2, p. 140.
- Monson A.J., Mathioudakis M., Kowalski A.F., 2024. *Astrophys. J.*, vol. 963, no. 1, p. 40.
- Namekata K., Maehara H., Honda S., et al., 2022. *Astrophys. J. Lett.*, vol. 926, no. 1, p. L5.
- Namekata K., Airapetian V.S., Petit P., et al., 2024. *Astrophys. J.*, vol. 961, no. 1, p. 23.
- Namizaki K., Namekata K., Maehara H., et al., 2023. *Astrophys. J.*, vol. 945, no. 1, p. 61.
- Notsu Y., Maehara H., Honda S., et al., 2019. *Astrophys. J.*, vol. 876, no. 1, p. 58.
- Notsu Y., Kowalski A.F., Maehara H., et al., 2024. *Astrophys. J.*, vol. 961, no. 2, p. 189.
- Núñez A., Agüeros M.A., Covey K.R., et al., 2022. *Astrophys. J.*, vol. 931, no. 1, p. 45.
- Núñez A., Agüeros M.A., Curtis J.L., et al., 2024. *Astrophys. J.*, vol. 962, no. 1, p. 12.
- Okamoto S., Notsu Y., Maehara H., et al., 2021. *Astrophys. J.*, vol. 906, no. 2, p. 72.
- Oks E., 2006. Stark Broadening of Hydrogen and Hydrogenlike Spectral Lines in Plasmas.
- Oks E., Gershberg R.E., 2016. *Astrophys. J.*, vol. 819, no. 1, p. 16.
- Paudel R.R., Barclay T., Schlieder J.E., et al., 2021. *Astrophys. J.*, vol. 922, no. 1, p. 31.
- Pevtsov A.A., Fisher G.H., Acton L.W., et al., 2003. *Astrophys. J.*, vol. 598, no. 2, pp. 1387–1391.
- Pietras M., Falewicz R., Siarkowski M., Bicz K., Preś P., 2022. *Astrophys. J.*, vol. 935, no. 2, p. 143.
- Pillitteri I., Micela G., Maggio A., Sciortino S., Lopez-Santiago J., 2022. *Astron. Astrophys.*, vol. 660, p. A75.
- Pillitteri I., Colombo S., Micela G., Wolk S.J., 2023. *Astron. Astrophys.*, vol. 673, p. A61.
- Pineda J.S., Villadsen J., 2023. *Nature Astronomy*, vol. 7, pp. 569–578.
- Popinchalk M., Faherty J.K., Kiman R., et al., 2021. *Astrophys. J.*, vol. 916, no. 2, p. 77.

- Rabello Soares M.C., de Freitas M.C., Ferreira B.P.L., 2022. *Astron. J.*, vol. 164, no. 5, p. 223.
- Ramsay G., Kolotkov D., Doyle J.G., Doyle L., 2021. *Solar. Phys.*, vol. 296, no. 11, p. 162.
- Reiners A., Shulyak D., Käpylä P.J., et al., 2022. *Astron. Astrophys.*, vol. 662, p. A41.
- Reinhold T., Shapiro A.I., Solanki S.K., Basri G., 2022. *Astrophys. J. Lett.*, vol. 938, no. 1, p. L1.
- Rigney J., Ramsay G., Carley E.P., et al., 2022. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, vol. 516, no. 1, pp. 540–549.
- Rodríguez L.F., Lizano S., Cantó J., González R.F., 2023. *Astron. Astrophys.*, vol. 678, p. A185.
- Sairam L., Pathak U., Singh K.P., 2023. *Journal of Astrophysics and Astronomy*, vol. 44, no. 2, p. 90.
- Sakaue T., Shibata K., 2021. *Astrophys. J. Lett.*, vol. 906, no. 2, p. L13.
- Saunders N., van Saders J.L., Lyttle A.J., et al., 2024. *Astrophys. J.*, vol. 962, no. 2, p. 138.
- Schmitt J.H.M.M., Ioannidis P., Robrade J., et al., 2021. *Astron. Astrophys.*, vol. 652, p. A135.
- See V., Roquette J., Amard L., Matt S., 2023. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, vol. 524, no. 4, pp. 5781–5786.
- Seligman D.Z., Rogers L.A., Feinstein A.D., et al., 2022. *Astrophys. J.*, vol. 929, no. 1, p. 54.
- Senavci H.V., Kılıçoğlu T., Işık E., et al., 2021. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, vol. 502, no. 3, pp. 3343–3356.
- Shan Y., Revilla D., Skrzypinski S.L., et al., 2024. *Astron. Astrophys.*, vol. 684, p. A9.
- Shlyapnikov A.A., 2024a. Catalog of Stars with Solar-Type Activity – CSSTA ([arXiv:2402.15241](https://arxiv.org/abs/2402.15241)). Available at: <https://arxiv.org/abs/2402.15241>.
- Shlyapnikov A.A., 2024b. *Geomagnetism and Aeronomy*, vol. 63, no. 8, pp. 1308–1312.
- Simões P.J.A., Araújo A., Válio A., Fletcher L., 2024. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, vol. 528, no. 2, pp. 2562–2567.
- Stelzer B., Bogner M., Magaudda E., Raetz S., 2022a. *Astron. Astrophys.*, vol. 665, p. A30.
- Stelzer B., Caramazza M., Raetz S., Argiroffi C., Coffaro M., 2022b. *Astron. Astrophys.*, vol. 667, p. L9.
- Suresh A., Chatterjee S., Cordes J.M., Bastian T.S., Hallinan G., 2020. *Astrophys. J.*, vol. 904, no. 2, p. 138.
- Toriumi S., Airapetian V.S., 2022. *Astrophys. J.*, vol. 927, no. 2, p. 179.
- Toriumi S., Airapetian V.S., Namekata K., Notsu Y., 2022. *Astrophys. J., Suppl. Ser.*, vol. 262, no. 2, p. 46.
- Tristan I.I., Notsu Y., Kowalski A.F., et al., 2023. *Astrophys. J.*, vol. 951, no. 1, p. 33.
- Tsvetkova S., Morin J., Folsom C.P., et al., 2024. *Astron. Astrophys.*, vol. 682, p. A77.
- Tu Z.L., Yang M., Wang H.F., Wang F.Y., 2021. *Astrophys. J., Suppl. Ser.*, vol. 253, no. 2, p. 35.
- Valio A., Araújo A., 2023. Stellar differential rotation from transit spot mapping, [doi:10.5281/zenodo.8144618](https://doi.org/10.5281/zenodo.8144618).
- Vasilyev V., Reinhold T., Shapiro A.I., et al., 2022. *Astron. Astrophys.*, vol. 668, p. A167.
- Veronig A.M., Odert P., Leitzinger M., et al., 2021. *Nature Astronomy*, vol. 5, pp. 697–706.
- Webb S., Flynn C., Cooke J., et al., 2021. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, vol. 506, no. 2, pp. 2089–2103.
- Wood B.E., Müller H.R., Redfield S., et al., 2021. *Astrophys. J.*, vol. 915, no. 1, p. 37.
- Xu F., Gu S., Ioannidis P., 2022. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, vol. 514, no. 2, pp. 2958–2973.
- Yamashita M., Itoh Y., Oasa Y., 2022. *Publications of the ASJ*, vol. 74, no. 6, pp. 1295–1308.
- Ye L., Bi S., Zhang J., et al., 2024. *arXiv e-prints*, p. arXiv:2401.15438.
- Zhang W., Zhang J., He H., et al., 2022. *Astrophys. J., Suppl. Ser.*, vol. 263, no. 1, p. 12.
- Zhang J., Tian H., Zarka P., et al., 2023. *Astrophys. J.*, vol. 953, no. 1, p. 65.
- Zhao Z.H., Hua Z.Q., Cheng X., Li Z.Y., Ding M.D., 2024. *Astrophys. J.*, vol. 961, no. 1, p. 130.
- Zic A., Murphy T., Lynch C., et al., 2020. *Astrophys. J.*, vol. 905, no. 1, p. 23.

Izv. Krymsk. Astrofiz. Observ. 120, № 2, 36–66 (2024)

Stars with solar-type activity: Investigations in recent years

R.E. Gershberg

Crimean Astrophysical Observatory, Nauchny 298409
gershberg@craocrimea.ru

Abstract. The work systematizes and summarizes the main results of the studies of stars with solar-type activity – from red and brown dwarfs to Sun-like stars. The studies carried out primarily in the 2020s are reviewed, and the results obtained are grouped into the following sections: databases and catalog, photospheres and starspots, rotation, chromosphere, corona, flares, magnetic fields, activity cycles, and exoplanets.

Key words: red dwarfs and Sun-like stars, databases and catalog, photospheres and starspots, rotation, chromosphere, corona, flares, magnetic fields, activity cycles and exoplanets