

ОБЗОР*

Звёзды с активностью солнечного типа: исследования последних лет

Р.Е.Гершберг

А Б С Т Р А К Т

В работе систематизированы и обобщены основные результаты исследований звёзд с активностью солнечного типа – от красных и коричневых карликов до солнцеподобных звёзд. Рассматриваются исследования, которые были проведены преимущественно в 20-е годы, и полученные результаты сгруппированы по разделам: базы данных и каталоги, фотосферы и звёздные пятна, вращение, хромосфера, корона, вспышки, магнитные поля, циклы активности и экзопланеты.

Ключевые слова: базы данных и каталоги, фотосферы и звёздные пятна, вращение, хромосфера, корона, вспышки, магнитные поля, циклы активности и экзопланеты.

1. ВВЕДЕНИЕ

При наблюдениях области Эта Carinae на 10-дюймовом телескопе в Иоганнесбурге датский астроном Эйнар Герцшпрунг (Герцшпрунг, 1924) обнаружил на пластинке 29 января 1924 года новую переменную звезду: на третьем из 5 получасовых снимков, полученных в эту ночь, она оказалась ярче, чем на первых двух на $1^m.8$, на четвёртом – 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 Lyrae, ни с Новой, и связал её вспышку с падением на звезду малой планеты. Как потом выяснилось, так были открыты вспыхивающие красные карлики, а переменная Герцшпрунга получила стандартное обозначение DN Car. В течение ста лет на этом M4 карлике никакие другие проявления активности не были обнаружены.

В последующие четверть века были открыты ещё несколько таких звёзд, но трудности наблюдений из-за их слабого блеска не вызвали

**Настоящий обзор подготовлен к крымской конференции, посвящённой столетию со дня открытия Эйнаром Герцшпрунгом вспыхивающих красных карликов.*

особого интереса. С прогрессом в технике наблюдений и новыми методами обработки получаемых данных в середине минувшего века ситуация изменилась. Когда в фотометрии звёзд возобладала электрофотометрия, она заменила объективностью визуальные наблюдения и высокой точностью, чувствительностью и временным разрешением фотографические исследования. В результате были открыты сотни красных карликовых звёзд, составлены первые каталоги таких переменных, установлена неперIODичность их вспышек, обнаружен степенной характер энергетического спектра вспышек, по фотометрическим рядам в десятки лет обнаружена цикличность активности таких звёзд. 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 звёздных хромосфер в спокойном и

вспышечном состояниях, температуры, плотности и скорости движения вещества вспышек. Эти оптические результаты позволили установить изменения различных спектральных линий вспышек на разных фазах их развития, определены параметры звёздных хромосфер в спокойном и вспышечном состояниях, температуры, плотности и скорости движения вещества вспышек. Эти оптические результаты позволили установить физическую идентичность вспышечной активности красных карликов и активности Солнца. Спектры высокого разрешения и спектрополяриметрические методы привели к открытию звёздных магнитных полей. С появлением крупных радиотелескопов были открыты звёздные короны, измерены их тепловое излучение в спокойном состоянии звёзд и нетепловое излучение вспышек. С выходом в космос астрономических аппаратов стало доступно ультрафиолетовое и рентгеновское излучение вспыхивающих звёзд, их зарегистрированные линейчатые спектры позволили оценить параметры верхних атмосфер этих звёзд. Для анализа этих богатых экспериментальных данных одновременно проводились и необходимые теоретические исследования. Была развита теория Бальмеровского декремента для условий атмосфер таких звёзд, предложены различные методы оценки параметров холодных звёздных пятен, развита теория генерации магнитных полей на звёздах, позволившая оценивать структуры и напряжённости этих полей.

Последний по времени крупный шаг в экспериментальном изучении звёзд с активностью солнечного типа – это вывод в космос телескопов для панорамной фотометрии звёздных полей. Они дают возможность одновременных наблюдений тысяч объектов длительное время и с высоким временным разрешением. В результате были открыты весьма редкие звёздные вспышки, на 2-3 порядка величины превосходящие по энергетике

самые мощные солнечные вспышки, созданы каталоги таких звёзд, самые крупные из которых содержат сотни тысяч объектов.

В 2020 году была опубликована большая монография Гершберга, Клиорина, Пустильника и Шляпникова «Физика звёзд средних и малых масс с активностью солнечного типа», в которой довольно подробно была 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 их и ныне ведущиеся исследования, а также по тем или иным причинам несколько пропущенных в монографии публикаций, планируется обсудить на конференции.

А вот что написала о самом Эйнаре Герцшпрунге редакция российского Астрокурьева к его юбилею, имевшем место в прошлом году. Эта несколько сокращённая справка такова.

150 лет со дня рождения Эйнара Герцшпрунга

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

Основные научные работы Герцшпрунга относятся к астрофизике и звездной астрономии. В 1905-1907 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 возрастах 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 году 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.

2. Базы данных и каталоги
3. Фотосферы и звездные пятна
4. Вращение
5. Хромосферы и протуберанцы
6. Короны и звездный ветер
7. Вспышки и супервспышки
8. Магнитные поля
9. Цикличность и эволюция активности
10. Экзопланеты.

Необходимо, конечно, иметь в виду некоторую условность отнесение 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 Дистефано и др. (2022) составили каталог 474026 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 430000 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.

Чахал и др. (2022) составили каталог переменных типа BY Dra, содержащий 84697 звезд спектральных типов FGKM 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 К-звёздами, и 94% объектов имеют периоды вращения менее 10 суток. и, следовательно, это молодые звёзды, не прошедшие эффективного торможения. В работе обсуждаются корреляции перечисленных параметров в рамках представлений о различиях звёздных структур разных температур, разных возрастов и магнетизма разной степени насыщенности. У К-звёзд обнаружилась более высокая магнитоактивная доля, чем у М-звёзд.

Энгл (2023) составил 15-страничный обзор по рентгену, ультрафиолету и отношению активность-возраст + 20 страниц таблиц с многочисленными параметрами многих М карликов.

Для массового определения возраста звёзд по эмпирическим корреляциям периода вращения, хромосферной активности и возраста E и др. (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, Кеплер и Гайа. Сопоставление этих данных обнаружило выраженную корреляцию между P_{rot} , возрастом и $[Fe/H]$ на протяжении всей фазы ГП для F карликов. Для G карликов P_{rot} и $\lg R'_{HK}$ являются надёжными зондами возраста в диапазонах $\sim 2-11$ и $\sim 2-13$ млрд лет соответственно. У K карликов наблюдается заметное снижение $\lg R'_{HK}$ в возрастном диапазоне $\sim 3-13$ млрд лет.

Шляпников (2024) подготовил третью версию «Каталога звёзд с активностью солнечного типа» (CSSTA-3). Она содержит 314618 объектов со следующими данными: главное обозначение объекта, его экваториальные координаты, основной тип объекта, его тип переменности по GCVS, звёздная величина V по разным источникам, величины в минимуме и в 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 “Physics of mid- and low-mass stars with solar-type activity and their impact on exoplanetary environments” by R.E.Gershberg, N.I.Kleeorin, L.A.Pustilnik, V.S.Airapetian and A.A.Shlyapnikov (Симферополь, ООО Форма, 2024, 764С.).

3. ФОТОСФЕРЫ И ЗВЁЗДНЫЕ ПЯТНА

В рамках крымской зональной модели запятнённости звёзд Алексеев и Кожевникова (2017, 2018) рассмотрели вариации этой запятнённости у 12 М- и 13 G-K карликов в течение десятилетий и нашли у 11 звёзд дрейф пятен к полюсу, у 6 звёзд заподозрили циклы активности длительностью от 25 до 40 лет. Найденные скорости дрейфа пятен по широте оказались в 2-3 раза меньше, чем на Солнце.

Иоаннидис и Шмитт (2020) провели на 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 чётко определённых долготах и от низких до высоких широт. Положения пятен определялись как дифференциальным вращением звезды, так и продолжительностью их жизни в 10-20 суток. На менее запятнённой полусфере звезды частота вспышек оказалась на 60% меньше, чем на более запятнённой, но то обстоятельство, что их число не падает до нуля, интерпретируется как наличие высокоширотных пятен, каких нет на Солнце.

Джонсон и др. (2021) опубликовали первый анализ ожидаемых фотометрических особенностей магнитоактивных G-M звёзд 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.

Сенавки и др. (2021) выполнили обширные исследования EK Dra в оптическом диапазоне длин волн. Они определили обилия 23 элементов с $[Fe/H] = 0.03$ и значительными избытками лития и бария; элементы s-процесса Sr, Y, Ce обнаружили небольшие избытки, тогда как Ni, Cu, Zn небольшие недостатки относительно солнечных обилий. 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 главной последовательности. Доплеровский анализ за 15 суток привёл к выводу о существовании околополярного пятна и пятен на средних широтах при их отсутствии на низких широтах.

Сопоставив температуры звёздных пятен, найденные методом зональной запятнённости у 26 вспыхивающих звёзд, с температурами фотосфер этих звёзд, Алексеев и Гершберг (2022) 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 расчётами структуры атмосферы и/или МГД соображениями.

Бич и др. (2022) разработали программу моделирования кривых блеска запятнённых звёзд для оценки числа пятен и их параметров. Используя TESS наблюдения М карликов, они нашли наличие двух пятен на GJ 1243 со средней температурой около 2900 К и с запятнённостью 3% поверхности звезды и на V374 Peg – двух пятен с температурой около 3000 К и запятнённостью около 6 % поверхности звезды; для двух наблюдений YZ CMi, разделённых полутора годами, они нашли трёхпятенную модель со средней температурой около 3000 К и запятнённостью около 9% и четырёхпятенную модель со средней температурой около 2800 К и запятнённостью около 7 % поверхности звезды. Другая составленная ими программа автоматически отыскивает по кривым блеска вспышки. Они обнаружили 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 с телескопа Хаббла во время вспышки и в спокойном состоянии звезды, Флэпп и др. (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 H₂, линия создается в звезде, а не в диске или планете. Хотя указанная температура гораздо ниже, чем у звезды.

Кацова, Низамов и Шляпников (2022) 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 звёзд, обусловленная пятнами. У некоторых звёзд 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.

Ди Мауро и др. (2022) исследовали многолетние наблюдения на TESS магнитоактивной звезды-хозяина экзопланеты GJ 504. 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.

Као и Пинсонно (2022) оценили филлинг-факторы пятен в 240 звёздах рассеянных скоплений Плеяды и М67, используя оригинальный спектроскопический метод, дающий и разность температур звезда-пятно. В Плеядах филлинг-фактор насыщается на уровне 0.248 для активных звёзд и снижается при более медленном вращении, что можно представить функцией числа Россби. В М67 у GK звёзд ГП средние филлинг-факторы 0.030 и в 10 раз меньше у проэволюционировавших красных гигантов. Эффективные температуры активных звёзд 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 чех Вацлав Бумба – тогда аспирант А.Б.Северного в КрАО. Интерес к этой идее возрос в последние десятилетия, когда выяснилось, что запятнённость активных красных карликов превышает солнечную на 2-3 порядка величины и столь же более мощны максимальные звёздные вспышки по сравнению с солнечными. Здесь следует отметить недавний интересный результат Кацовой и др. (2022). Они показали, что частота слабых вспышек практически не зависит от степени запятнённости Солнца, тогда как частота сильных вспышек заметно нарастает во всё более крупных активных областях. Это обстоятельство объясняет, в частности, отсутствие на Солнце супервспышек.

Ямашита и др. (2022) рассмотрели свидетельства активности у звёзд ГП нулевого возраста, где ожидаются огромные звёздные пятна и сильные хромосферные эмиссионные линии. По данным TESS они получили кривые блеска 33 звёзд в IC 2391 и IC 2602, амплитуды кривых блеска составили 0.001- 0^m.145, филлинг-фактор пятен - 0.1 – 21 % . И зарегистрировали 21 вспышку с энергиями 10³³⁻³⁵ эрг.

Ксю и др. (2022) проанализировали пятна и хромосферную активность звезды HD 34319 по наблюдениям на TESS и спектроскопии на Верхнем Провансе и на Кек телескопе в 1995-2013 годы. Они применили двухпятенную модель с периодом вращения 4.4364 суток, измерили эквивалентные ширины линий CaII и водорода и предложили схему развития пятен. Однако, обращение к сорокалетней давности двухпятенной концепции Родоно удивляет.

Мартин др. (2023) 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, Мартин и др. обнаружили сильную и переменную пятенную модуляцию, наводящую на предположение о группировке пятен и циклы активности в годы. Наконец, они открыли 125 вспышек, причём частота вспышек не уменьшалась во время затмений, и высказали предположение, что вспышки предпочтительно полярные.

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

Араужо и Валио (2023) исследовали активность двух К-звёзд, наблюдавшихся обсерваторией Кеплера, сходных во всём от массы до периода вращения и планетных систем. Обе звезды демонстрируют около сотни пятен, найденных методом транзитного картирования, но на Кеплере 411 произошло 65 супервспышек, а на Кеплере 210 ни одной. Но параметры пятен определённо 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 тёмные и несколько горячее, чем на звезде с супервспышками. Возможно, это указывает на меньшую напряжённость магнитного поля либо на его более простую структуру.

По вековой фотометрии и 200-суточной спектроскопии высокого разрешения в 2018 году Ковари и др. (2023) 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 запятнённая звезда ГП нулевого возраста со слабым дифференциальным вращением, третье тело – V815Her B - затменная тесная двойная с периодом 0.5 суток, состоящая из двух М карликов, а объект в целом – молодая четверная иерархическая структура 2+2.

Ди Майо и др. (2023) представили метод, позволяющий моделировать звёздную фотосферу с пятнами у молодых активных и быстро вращающихся звёзд. 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 звёздную фотосферу.

Монсон и др. (2024) исследовали влияние вспышек в звёздных атмосферах на состояние подфотосферного вещества. Используя радиационно-гидродинамические расчёты и расчёты 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, причём разные участки спектральной линии полезны для исследования отдельных областей скоростных потоков атмосферы.

4. ВРАЩЕНИЕ

Попинчалк и др. (2021) установили основы гирохронологии М карликов. Они собрали периоды вращения 713 М0-М8 звёзд, определённые по кривым блеска, полученным обсерваторией Кеплера, добавили к ним периоды вращения звёзд скоплений с 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 H_α и тангенциальных скоростей. Они нашли, что возраст перехода быстрого к медленному вращению в скоплениях, который они определили 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 H_α. Более красные и меньшие звёзды остаются активными до большего возраста.

Используя спектрополяриметрию на Большом бинокулярном телескопе, литературные данные по зеемановским доплеровым изображениям, данные рентгеновского излучения, Gaia и астросейсмологии, Меткалф и др. (2022) сопоставили скорости вращения компонентов пар звёзд 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 Медина и др. (2022) составили полную выборку 219 одиночных М карликов с массой 0.1-0.3 M_☉ 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 звёзд показатель степени составляет 1.984 ± 0.019 . Если считать, что в тонком диске Галактики звёзды постоянно образуются последние 8 млрд лет, то переход от насыщенного к ненасыщенному режиму активности имеет место в 2.4 ± 0.3 млрд лет. Звёзды 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. Звёзды с периодами вращения менее 10 суток и массой 0.2-0.3 M_☉ имеют средний возраст 0.6 ± 0.3 млрд лет, а с массой 0.1-0.2 M_☉ – возраст 2.3 ± 1.3 млрд лет.

Лу и др. (2022) с помощью Zwicky Transient Facility составили каталог, содержащий 40553 периода вращения звёзд.

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

На стадии до главной последовательности скорость вращения солнцеподобной звезды определяется взаимодействием протозвёздного 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, Бойл и Бума (2022) провели совместный анализ данных TESS, Gaia и LAMOST, составили обширный список звёзд одного возраста и заключили, что возраст наиболее разбросанных членов скопления близок к 50 миллионам лет.

Используя наблюдения AU Mic на TESS, Ильин и Поппенхэгер (2022) попытались проверить гипотезу, не 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 звёздным 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 Меткалф и др. (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 тормозной момент каждой звезды в эволюционной последовательности и нашли, что скорость потери углового момента падает более, чем на порядок величины, между возрастами HD 76151 и 18 Sco – 2.6 и 3.7 млрд лет – и продолжает уменьшаться у Cyg AB – 7 млрд лет.

Как показали Райнхольд и др. (2022), для определения периода вращения звёзд с аperiodическими кривыми блеска можно использовать метод G_{PS} , основанный на анализе не спектра мощности, а градиента спектра мощности. Авторы показали, что G_{PS} метод способен определить правильный период вращения в 40% всех рассмотренных случаев и он значительно превосходит методы автокорреляции.

Для изучения связи вращения и активности Нуньес и др. (2022, 2023) получили оптические спектры 250 звёзд, рентгеновское излучение – 10 и периоды вращения – 28 звёзд в Яслях; в Гиадах аналогичные новые данные относятся к 131, 22 и 137 звёздам. Эти данные были использованы для подсчёта 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 H_{α} , причём двойные системы и одиночные звёзды 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 H_{α} . Но эти излучения по интенсивности близки, что позволяет предположить, что корона и хромосфера испытывают одинаковый магнитный нагрев.

Монш и др. (2023) исследовали связь времени жизни околозвёздных дисков и эволюции вращения звёзд малых масс. Используя модель испарения под действием ультрафиолетового и рентгеновского излучения, они получили простой рецепт для расчёта влияние блокировки дисков на эволюцию вращения. Монш и др. обнаружили, что продолжительность фазы блокировки диска влияет на последующую вращательную эволюцию молодой звезды. Этот подход приводит к согласию расчётов с наблюдаемыми распределениями периодов вращения в рассеянных скоплениях разных возрастов.

По выборке из 44 звёзд ГП с хорошо известными периодами циклов активности и периодами вращения, Миттаг и др. (2023) исследовали связь между этими параметрами. Они нашли линейное поведение в двойном логарифмическом соотношении между числом Россби и периодом цикла. Бифуркация на длиннопериодную 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 для периода Швабе на Солнце получается 10.3 года и для цикла Глейсберга – 104 года. Далее, они предположили, что циклы на короткопериодической ветви генерируются в более глубоких слоях конвективной зоны, а циклы длиннопериодной 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.

Для объяснения существования двух ветвей на диаграмме период - скорость вращения - звёзды «неактивной» ветви показывают короткие циклы динамо, а звёзды активной ветви показывают относительно длинные магнитные циклы – Пипин (2023) предположил, что это явление может быть вызвано удвоением частоты динамо-волн, обусловленным возбуждением второй гармоники из-за нелинейных эффектов B^2 в крупномасштабном динамо.

Кармона и др. (2023) исследовали в NIR и в оптике вращение AD Leo с целью 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 2м/с соответственно. Сделан вывод о том, что экзопланета здесь не при чём.

В первой половине жизни на главной последовательности из-за магнитного торможения звёзды быстро теряют угловой момент, но когда число Россби достигает критического значения, торможение заметно ослабевает. Меткалф и др. (2023) проанализировали новую спектрополяриметрию старого G8 карлика τ Cet и зеэман-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.

Валио (2023) впервые представил анализ дифференциального вращения звёзд с использованием карт транзита звёздных пятен у солнцеподобных звёзд и у M карликов. Он представил дифференциальные профили вращения у 13 наблюдавшихся обсерваториями Кеплера и CoRoT медленно вращающихся звёзд с периодами вращения более 4.5 суток и спектральных типов от M 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.

Сондерс и др. (2023) обсудили до какой степени ослабленное магнитное торможение приводит к устойчивому быстрому вращению старых звёзд. Они обнаружили, что выборка звёзд с периодами вращения и возрастом, измеренными с помощью астросейсмологии, согласуется с моделями, которые отклоняются от стандартного вращения до достижения эволюционной стадии Солнца, и определили нормализованное критическое число Россби $Ro_{crit}/Ro_{\odot} = 0.91 \pm 0.03$ как порог отклонения от стандартной вращательной эволюции, то есть ослабленное магнитное торможение сказывается примерно на половине времени существования на ГП солнцеподобных звёзд.

Недавно Шан и др. (2024) определили периоды вращения большой выборки M0-M9 карликов, найденные фотометрически и спектроскопически, и составили таблицу 261 периода. Они рассмотрели зависимость вращения-активность с эмиссией в рентгене, H_{α} и линиях H и K ионизованного кальция и напряжённостью поверхностного магнитного поля и показали периоды вращения как функцию звёздной массы, возраста и галактической кинематики. За исключением трёх транзитных планетных систем и TZ Ari, все планеты-хозяева этой выборки имеют периоды вращения более 15 суток.

5. ХРОМОСФЕРЫ И ПРОТУБЕРАНЦЫ

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

Лайтцингер и др. (2022) - рассмотрели событие на молодом Меркарлике V374 Peg, в ходе которого на синей стороне бальмеровских линий появилось дополнительное излучение. Путём 1D NLTE расчёта 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 Ланцафаме и др. (2022) провели систематический анализ свечения в звёздах инфракрасного триплета Ca II. Рассмотрены положения этих звёзд на диаграмме цвет-величина и корреляция с амплитудой фотометрической вращательной модуляции. Они нашли, что самый высокий уровень ИКТ активности связан с PMS звёздами и RS CVn двойными системами и некоторые свидетельства бимодального распределения звёзд на главной последовательности при $T_{\text{eff}} > 5000 \text{ K}$. Звёзды с температурами $3500 \text{ K} < T_{\text{eff}} < 5000 \text{ K}$ оказались либо очень активными PMS звёздами или активными звёздами главной последовательности с униполярным распределением. Драматическое изменение распределения активности найдено для $T_{\text{eff}} < 3500 \text{ K}$ с доминированием звёзд низкой активности вблизи перехода между частично и полностью конвективными звёздами и подъёмом активности в условиях полной конвекции.

Мюньер и др. (2022) рассмотрели соотношения хромосферных эмиссий H_α и CaII во временных рядах у 441 F-G-K звёзды и у нескольких процентов объектов обнаружили антикорреляцию этих линий, что не наблюдается на Солнце. Они заключили, что одни факелы не могут объяснить наблюдаемое разнообразие отношения этих линий и привлекли для объяснения

наблюдений волокна, у которых другие отношения этих линий. С другой стороны, по FGK карликам, наблюдавшимся на HARPS в течение 13 лет, да Сильва и др. (2022) отметили существенную зависимость корреляции этих хромосферных линий от ширины полосы пропускания линии H_{α} : корреляция максимальна при измерении водородной линии с полосой 0.6 \AA , но может оказаться даже отрицательной при очень широкой полосе пропускания.

По наблюдениям на телескопах Хаббла и Apache Point и южной обсерватории Gemini Дувури и др. (2022) исследовали вневысшечную изменчивость хромосфер 9 M карликов. Исследовались Бальмеровские линии от H_{α} до H_{10} и линии H и K CaII. Было найдено, что при минутных экспозициях в течение часа эти линии изменяются в пределах 1-20%, и эта амплитуда была больше у быстрее вращающихся звёзд. Но в ультрафиолетовых линиях NV, SiIV, CIV, CII и HeII отношения S/N были слишком малы для обнаружения стохастических изменений.

Кумар и Фарес (2022) исследовали 14-летние наблюдения в спектрах GJ 436 линии H и K CaII, HeI_{D3}, NaI, H_{α} , CaII IRT и обнаружили положительные корреляции переменности H и K CaII и H_{α} и водорода и гелия, а инфракрасные линии CaII и H_{α} – отрицательную корреляцию. H и K линии Ca II обнаружили период ~ 6.8 года, линии натрия – ~ 5.1 года и линия водорода – ~ 5.9 года при фотометрическом цикле ~ 7.4 года. Кроме того, линии H и K CaII и H_{α} обнаружили периоды около 40 суток, отождествлённые с периодом вращения звезды.

База данных хромосферной активности солнцеподобных звёзд на основе спектроскопического обзора низкого разрешения, полученного на телескопе LAMOST, была создана Жангом и др. (2022). По 1330654 высококачественным спектрам оценены фотометрические параметры линий H и K CaII и уровень хромосферной активности S.

Марвин и др. (2023) выполнили абсолютные измерения потоков H и K CaII и H_{α} у 110 HARPS звёзд 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, Намеката и др. (2023) 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 H_{α} , свидетельствовавшие о выбросах волокон. В ходе одновременных оптических и рентгеновских наблюдений EK Dra Намекатой и др. (2023) 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 H_{α} , смещённые 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 оптике и рентгене в наблюдаемых супервспышках согласуется с тем, что имеет место на Солнце, на М карликах и в тесных двойных системах, и это может быть важно для ранних Венеры, Земли, Марса и молодых экзопланет.

Икута и Шабата (2024) проанализировали крупное извержение волокон, связанное с одной из описанных выше супервспышек EK Dra. Они обнаружили, что поглощение в H_{α} , первоначально показавшее смещение на -510 км/с, со времени 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_{α} в спектре EK Dra можно объяснить такой моделью с более длительным временем и большими пространственными масштабами, чем CMe на Солнце.

6. КОРОНЫ И ЗВЁЗДНЫЙ ВЕТЕР

Сакае и Шибата (2020) построили модель нелинейного распространения Альфвеновских волн и заключили, что эти волны могут играть решающую роль, как в нагреве короны, так и в стимулировании звёздного ветра. В рамках такого сценария они построили одномерную сжимаемую МГД модель распространения Альфвеновских волн для Солнца и М карликов от фотосфер до ветра и межпланетной среды и пришли к выводу, что корональная температура М карликов должна быть ниже, чем у Солнца, скорость ветра больше солнечного, а уносимая масса вещества много меньше, чем у Солнца.

Используя VLA в диапазоне частот 2-4 ГГц, Суреш и др. (2020) открыли на уровне 29 микроЯн стационарное радиоизлучение ϵ Eri на расстоянии менее 0.2 угловых секунд от звезды. Комбинируя эти результаты с ранее обнаруженным радио континуумом этой звезды, они нашли его излом на частоте 6 ГГц. Авторы приписали эту эмиссию оптически толстому тепловому гирорезонансному излучению звёздной короны, как это предполагалось ранее для частот ниже 1 ГГц. Крутой спектральный индекс около 2 противоречит его интерпретации как связанным 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 Хаббла, Вуд и др. (2021) исследовали профили поглощения линии Ly_{α} девяти М карликов,

возникающие при взаимодействии звёздного ветра и межзвёздной среды. Они оценили темпы потери массы, ограничения на звёздные ветры и их зависимость от корональной активности. С учётом прежних данных у 13 из 15 М карликов 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. Вуд и др. заключили, что не только корональная активность и спектральный тип определяют свойства ветра и, возможно, сильные ветры в значительной мере определяются СМЕ.

Айрапетян и др. (2021) развили трёхмерную термодинамическую МГД модель системы звёздная корона + ветер и, используя наблюдения в рентгене, в EUV, на телескопе Хаббла и TESS, построили модели нагреваемой потоком Альфвеновских волн короны и ветра молодой звезды κ^1 Cet для двух эпох, разделённых 11 месяцами. Они 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%.

Каванаг и др. (2021) выдвинули идею о возбуждении радиоизлучения AU Mic движущейся в её короне планетой.

Шмитт и др. (2021) провели сопоставление оптической фотометрии молодого быстрого ротатора AB Dor и его рентгеновских наблюдений в течение около 20 суток на eROSITA российско-немецкого аппарата Спектр-Рентген-Гамма. Постоянное рентгеновской 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.

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

Магаудда и др. (2021) из первого рентгеновского обзора eROSITA составили выборку 704 звёзд спектральных типов K5-M7 и 501 из них сопоставили с оптическими результатами TESS, что позволили сделать количественные ограничения на зависимость рентгеновской светимости от массы и определить изменения уровня активности относительно объектов до ГП. Они определили периоды вращения 180 М карликов, излучающих рентген, и оценили уровень насыщения в отношении вращение-активность. Сравнение отношений жёсткости и спектров показало, что 65% этих источников рентгена имеют температуру около 0.5 кэВ. Сравнение с результатами 30-летней давности, полученными на ROSATe, позволило получить представление о долговременной переменности этих источников.

Для рассмотрения космической погоды около Солнца, когда ему было 0.6 млрд лет и на Земле появилась жизнь, Эвенсбергер и др. (2021) рассчитали трёхмерные модели звёздных ветров для пяти молодых солнцеподобных звёзд в Гиадах, возраст которых 0.6 млрд лет, используя их магнитограммы и моделирование ветра, возбуждаемого Альфвеновскими волнами. Взяты соответствующие фундаментальные параметры этих звёзд и два значения абсолютной напряжённости 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.

Пиллиттери и др. (2022) в течение 8 лет провели на 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 жёсткости излучения вне вспышек и нашли степенное распределение вспышек по энергии. Кроме вспышек, нет заметных изменений в потоке и жёсткости коронального излучения на шкале в несколько месяцев и годы, так что нет обнаружимых циклов активности на этих масштабах.

Ториуми и Айрапетян (2022) проанализировали 10-летние многоволновые наблюдения Солнца как звезды и молодых солнцеподобных звёзд, значительно расширили исследования Певцова и др. (2003) обнаружившие тесное степенное соотношение между хромосферным переходным диапазоном и дальним корональным ультрафиолетом, крайним ультрафиолетом и потоками рентгеновской эмиссии и общим магнитным беззнаковым потоком. Они 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 звёзд, несмотря на возраст и уровень активности.

Алвараво-Гомез и др. (2022) выполнили трёхмерное численное моделирование звёздного ветра AU Mic и рассмотрели эволюцию мощного выброса корональной массы с учётом наблюдаемых ограничений на магнитное поле звезды и параметры выброса.

Фурмайстер и др. (2022) провели одновременные наблюдения Prox Cen в рентгене на LETGS/Chandra и в FUV на STIS/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 и в спокойном состоянии звезды, амплитуды вспышек достигали $A_X = 30$ и $A_{FUV} = 20$. DEM была представлена

полиномами Чебышева в диапазоне lgT 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.

Чен и др. (2022) по наблюдениям EV Lac на Chandra исследовали вариации профилей эмиссий в нескольких вспышках и по измерениям линий OVIII, FeXVII, MgXII и SiXIV обнаружили движения корональной плазмы со скоростями до 130 км/с и их связи с корональными выбросами, причём скорости восходящих потоков обычно растут с температурой. Переменные отношения линий триплета SiXIII в большинстве вспышек показали увеличение плотности и температуры коронального вещества. Чен и др. связали эти результаты с 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 Бастиан и др. (2022) провели на радиотелескопе MeerKAT наблюдения UV Cet в диапазоне частот 886-1686 МГц. Они зарегистрировали вспышку продолжительностью около 2 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 Бастиан и др. 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 расчётов нагрева верхних слоёв солнечной и звёздных атмосфер Ториуми и др. (2022) составили каталог спектральных индексов отношений излучений в спектральных линиях к поверхностному магнитному потоку, которые являются универсальными для Солнца и солнцеподобных звёзд разного возраста и уровня активности.

На аппарате XMM-Newton Коффаро и др. (2022) обнаружили корональные циклы у семи солнцеподобных звёзд, среди них ϵ Eri и ι Hor – самые молодые по 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% её короны покрыто магнитными структурами, что ответственно за малую амплитуду

рентгеновского цикла, и они предположили, что основное покрытие поверхности магнитными структурами может быть выше в короне самых молодых звёзд. Для проверки этой гипотезы они исследовали в рентгене солнцеподобную звезду Кеплер-63 с возрастом 210 млн. лет и с фотосферным циклом 1.27 года – самую молодую звезду, наблюдавшуюся в рентгене 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 счёт 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 Ригни и др. (2022) провели низкочастотные радионаблюдения на Австралийской Квадратной Миле (ASKAP) и у четырёх 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 мазера и гиротронного излучения.

Карамазца и др. (2023) составили полный список M0-M4 карликов в пределах 10 пс от Солнца и, анализируя эту выборку, получили сведения об общих свойствах М карликов как источников рентгеновского излучения. Были использованы архивные данные из ROSATa, XMM-Newton, eROSITA. 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.

На телескопе Хаббла, аппаратах Chandra и XMM-Newton и обсерватории Нила Герелса Свифта Браун и др. (2023) исследовали рентгеновское и ультрафиолетовое излучение К- и М-звёзд - родительских объектов экзопланет. На 21 из 23 рассмотренных звёзд измерена рентгеновская светимость. Кратковременная вспышечная активность обнаружена у большинства полностью конвективных объектов с $M < 0.35M_{\odot}$, чего нет у более массивных звёзд. Средние рентгеновские светимости составили $\sim 5 \cdot 10^{26}$ эрг/с и $\sim 2 \cdot 10^{26}$ эрг/с у частично и полностью конвективных звёзд старше 1 млрд. лет. Более молодые, полностью конвективные М карлики имеют светимости от 3 до $6 \cdot 10^{27}$ эрг/с.

Эвенсберт и др. (2023) отметили, что первоначальный широкий диапазон периодов вращения солнцеподобных звёзд 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 звёзд солнечного типа с возрастом от 24 до 130 млн лет и, с учётом своих предыдущих результатов, получили 30 согласованных трёхмерных моделей ветров. Модели хорошо охватывают до-Скаманичевскую фазу замедления звёздного вращения, связывая вращение, магнитное поле и возраст. При сравнении различных масштабов магнитного поля каждой звезды обнаруживается постепенное уменьшение показателя степенной зависимости с увеличением напряжённости 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. Боро Сайкия и др. (2023) исследовали, демонстрируют ли нетепловые движения в холодных звёздах аналогичную ситуацию. С этой целью по спектрам с телескопа Хаббла измерялось избыточное уширение в оптически тонких эмиссионных линиях хромосфер, переходных зон и корон. Оно оказалось коррелировано со скоростью вращения звезды. Они заключили, что, как и на Солнце, имеет место нагрев звёздных атмосфер альфвеновскими волнами, не исключая при этом и нагрева вспышками.

На сферическом пятиметровом радиотелескопе (FAST) Жанг и др. (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 полосообразную форму с почти одинаковой частотой частотного дрейфа, а на второй день обнаружили каплеобразную форму, что может быть обусловлено нестабильностью циклотронного мазера.

Чебли и др. (2023) выполнили количественные оценки ветровых свойств холодных звёзд ГП. Они промоделировали намагниченные ветры 21 холодной звезды от F до M, используя современный 3D-МГД код, основанный на наблюдаемых крупномасштабных распределениях магнитного поля. Чебли и др. проанализировали зависимости между спектральным типом, вращением и напряжённостью магнитного поля и размером альфвеновской поверхности, скоростью потери массы, скоростью потери углового момента, скоростью звёздного ветра, зависимость скорости потери массы от числа Россби. Полученные модели охватывают все обитаемые зоны всех звёзд выборки, что позволяет оценить динамическое давление ветра на обоих краях ГП.

Родригез и др. (2023) зарегистрировали от ϵ Eri непрерывное радиоизлучение на частотах 10 и 33 ГГц, природа которого ещё не

установлена. Они обнаружили вариации этого излучения на масштабах суток, часов и минут, а 15 апреля 2020 года оно продемонстрировало радиоимпульс на частоте 10 ГГц длительностью около 20 минут и амплитудой 4, который они смоделировали излучением ударной волны, врезающейся в звёздный ветер.

Блот и др. (2023) провели радиомониторинг AU Mic в течение более 250 часов на Австралийской Квадратной Миле 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 её круговой поляризации сопериодична вращению звезды и может быть обусловлена гиромагнитной эмиссией с магнитным наклоном, по крайней мере в 20° .

Джозеф и др. (2024) составили выборку из 256 M карликов, которые наблюдались одновременно в рентгене с германского аппарата eROSITA на борту российской миссии Спектр-Рентген-Гамма и в оптике со спутника TESS, и характеризуются сравнительной близостью – до 100 пс, быстрым вращением - $P_{\text{rot}} < 9$ суток, и высокой частотой вспышек. Огласно анализу звёзд выборки, более быстрые ротаторы обнаружили большую изменчивость и частые рентгеновские вспышки этих звёзд часто совпадают с оптическими вспышками.

7. ВСПЫШКИ И СУПЕРВСПЫШКИ

Окамото и др. (2020) по большой выборке из 2341 супервспышки на 265 звёздах солнечного типа уточнили результаты Ноцу и др. (2019): максимальная энергия супервспышек на солнечноподобных звёздах 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 звёзд 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. На рассмотренных звёздах с супервспышками не

найденны экзопланеты, что означает отсутствие их необходимости для таких мощных вспышек.

По данным обсерватории Кеплера Ильин и др. (2020) исследовали вспышки по 3435 80-суточным кривым блеска 2111 членов открытых скоплений Pleiades, Hyades, Praesepe, Ruprecht 147 и M67. В этих скоплениях весьма различных возрастов они подтвердили на G-M-звездах 3844 вспышек, распределения которых по энергиям имеют степенной вид со спектральными индексами 1.84-2.39. Ильин и др. нашли, что вспышечная активность уменьшается от средних M-звезд к G-звездам и от звезд ZAMS к звездам солнечного возраста, подтвердили понижение частот вспышек с возрастом и что оно больше у более массивных звезд. И нашли величины массы и скорости вращения, выше которых вспышечная активность перестаёт быть насыщенной.

По оптическим SDSS спектрам Коллер и др. (2020) провели поиск вспышек и связанных с ними выбросов корональной массы у F-M звезд ГП. Вспышки отыскивались автоматически по значительным изменениям амплитуд линий H_{α} и H_{β} после представления их ядер гауссианой. СМЕ определялись по асимметрии Бальмеровских линий, вызванных движением плазмы по лучу зрения. В результате они идентифицировали 281 вспышку K3-M9 звезд и 6 кандидатов СМЕ. Энергии вспышек в H_{α} 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 $6 \cdot 10^{16-18}$ г и проекции скоростей выбросов 300-700 км/с.

В апреле-июле 2019 года в ходе 40-часового патрулирования Prox Cen в диапазоне от радио до рентгена МакГрегор и др. (2021) зарегистрировали 1 мая в диапазоне от мм до FUV короткую вспышку огромной амплитуды: до 1000 на ALMA и 14000 на HST. Эти всплески, записанные с 1-секундным разрешением, были одновременны, тогда как оптическое излучение, зарегистрированное системой TESS с 2-минутным разрешением, имело амплитуду менее 2 и запаздывание относительно упомянутых всплесков около минуты. Вспышка началась как 5-секундный всплеск на мм и в FUV, после которого имело место примерно столь же быстрое угасание, так что кривая блеска вспышки была представлена симметричной гауссианой без заметной фазы экспоненциального затухания. Излучение на мм в максимуме всплеска достигло 2.14 ± 0.15 в единицах 10^{14} эрг/с·Гц, при этом произошло изменение спектрального индекса излучения от +2, соответствующего чёрнотельному излучению спокойной фотосферы, до -2.5, соответствующего синхротрону или гиротронному, и существенное изменение линейной поляризации излучения. Возможно, это третий случай регистрации

синхротрона в звёздной вспышке после наблюдений Бескина и др. (2017) и упомянутых выше МакГрегора и др. (2018).

В 2019 году на той же аппаратуре был проведен 14-часовой мониторинг Prox Cen, в течение которого была обнаружена ~50% круговая поляризация эмиссии (МакГрегор и др., 2021). Но во время упомянутого выше всплеска 1 мая на мм и в ультрафиолете никакое микроволновое событие не было зарегистрировано. 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 Зик и др. (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 (МакГрегор и др., 2021). По энергетическому спектру вспышек этой звезды, построенному по наблюдениям системой TESS, такие и более мощные вспышки происходят на ней в оптике 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 произошёл 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 чёрнотельного и синхротронного механизмов излучения.

Джэксон и др. (2021) по данным обсерватории Кеплера с высоким временным разрешением обнаружили на 403 звёздах 4430 вспышек с энергиями до $1.5 \cdot 10^{35}$ эрг. 515 вспышек были найдены вблизи других источников или в двойных системах, и частоты вспышек оказались систематически выше у слабых компонентов.

По данным второго года наблюдений TESS Ту и др. (2021) исследовали более 22500 звёзд 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 звёзд и указывает, что Солнце менее активно, чем эти звёзды со

сверхвспышками. Более горячие звёзды 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 Рамзэй и др. (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 (Кармакар и др., 2021). 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, Вебб и др. (2021) с помощью оригинальной машинно-обучаемой 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 градусов и нашли 19914 источников с точными расстояниями по Гайа 2. Они отождествили 96 вспышек с энергиями $10^{31}-10^{37}$ эрг на 80 звёздах, большинство которых М карлики, и подтвердили уменьшение доли вспыхивающих М-звёзд по мере роста их расстояния от плоскости Галактики. 70% вспышек были короче 8 минут, а средняя плотность вспышек составила $(2.9 \pm 0.3) \cdot 10^{-6}$ вспышки на пс⁻³с⁻¹.

Паудел и др. (2021) сообщили результаты одновременных наблюдений EV Lac на пяти обсерваториях. За 25 суток работы TESS они зарегистрировали 56 вспышек на этом аппарате и 3 вспышки в рентгене и ультрафиолете за 18 кс на Swifte, 9 вспышек за 98 кс наблюдений в ультрафиолете на NICERe и по одному 3-часовому наблюдению с UN88 и LCOGT. Диапазон энергий зарегистрированных на TESSe вспышек был от $10^{30.5}$ до $10^{33.2}$ эрг, вспышек, зарегистрированных на SWIFTe – от $10^{29.3}$ до $10^{31.1}$ эрг, 14 вспышек, зарегистрированных на NICERe от $10^{30.5}$ до $10^{32.3}$ эрг. Вспышки, зарегистрированные на TESSe, обнаружили степенное распределение с показателем -0.67. Но они не нашли признаки FIP эффекта.

Гетман и Файгольсон (2021) рассмотрели рентгеновские супервспышки звёзд до ГП: их энергетику и частоты. Солнцеподобные звёзды 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 они отобрали из своих предыдущих обзоров 1086 молодых – менее 5 млн лет - объектов из 40 близких областей звездообразования, их большинство со значительно более мощными оптическими и рентгеновскими вспышками, чем на ГП. Эти события имели место на молодых звёздах всех масс на эволюционных стадиях от протозвёзд до бездисковых звёзд и с положительной корреляцией частоты вспышек и массы звезды. Характеристики вспышек не зависят от присутствия или отсутствия у звезды диска. Индекс степенного распределения вспышек по энергиям близок к 2, то есть такой же, как у более старых звёзд и у Солнца. Мегавспышки с энергией $\lg E_x > 36.2$ эрг звёзд солнечной массы имеют частоту около 2 вспышек на звезду в год и составляют 10-20 % всей рентгеновской энергетике PMS звёзд

Файнштейн и др. (2021) проанализировали кривые блеска 161836 звёзд, наблюдавшихся с двухминутными экспозициями на TESS. Новая машинная программа обнаружила около миллиона вспышек. Звёзды 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 звёзд с массами менее 0.3 солнечной массы и около единицы у красных гигантов.

Ильин и др. (2021) показали, что вращение и магнетизм нарушают сферическую симметрию звёзд, что накладывает важные наблюдательные ограничения на звёздные магнитные поля и на оценку влияния звёздной активности на атмосферы экзопланет. Они 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.

Фурмайстер и др. (2021) провели сравнение результатов рентгеновского обзора неба аппаратом CPG и избыточного свечения в линиях CaII H и K, измеренного роботом TIGRE. Они обнаружили ожидаемую корреляцию между $\lg(L_x/L_{bol})$ и $\lg(R'_{HK})$, которая улучшается при отборе квазиодновременных наблюдений. Авторы считают, что циклические изменения на длительных временных интервалах важнее, чем корреляции краткосрочных вариаций типа вращательных модуляций или вспышек.

На скоростном спектрографе ULTRASPEC, установленном на 2.4-метровом Национальном телескопе Таиланда, Дойл и др. (2022) зарегистрировали на YZ CMi с субсекундным разрешением две вспышки каждая 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 случаях были обнаружены квазипериодические колебания 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.

Питрас и др. (2022) провели статистику звёздных 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 330000 звёзд и обнаружили более 25000 звёзд со вспышечной активностью с общим числом вспышек более 140000 с энергиями в диапазоне 10^{31} - 10^{36} эрг; то есть большинство зарегистрированных событий – это супервспышки. Около 7.7 % рассмотренных объектов являются вспыхивающими звёздами, но среди М 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 счёт нагрева фотосферы нетепловыми электронами. Максимум 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 напряжённости 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 Ямашита и др. (2022) рассмотрели кривые блеска 33 звёзд нулевого возраста в молодых звёздных скоплениях IC 2391 и IC 2602, оценили их амплитуды блеска от 0.001 до 0.145 , как и у молодых звёзд в Плеядах, и нашли филлинг-факторы пятен 0.1-21 %, и сильную эмиссию Ca II как у звёзд с супервспышками, на два порядка величины выше, чем у Солнца. На 12 звёздах этих скоплений с насыщенными излучениями хромосфер они обнаружили 21 вспышку с энергиями 10^{33} – 10^{35} эрг.

Концепция о решающей зависимости уровня активности солнечного типа звезды от степени её запятнённости недавно была разработана в работе Кацовой и др. (2022). Они показали, что частота слабых рентгеновских вспышек на Солнце практически не зависит от степени его запятнённости, тогда как частота мощных вспышек классов М и Х 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 звёздах. Они оценили напряжённость магнитных полей в звёздных пятнах как 2 кГс и максимальную энергию звёздных супервспышек $(1-3) \cdot 10^{36}$ эрг.

Намеката и др. (2022) сообщили об оптической регистрации спектроскопически и фотометрически с помощью Seimei телескопа и TESS продолжительной супервспышки на молодой (50-120 млн лет) солнцеподобной звезде EK Dra: энергия вспышки $2.6 \cdot 10^{34}$ эрг, длительность 2.2 часа – самая большая супервспышка на солнцеподобной звезде, открытая оптической спектроскопией. Профиль $H\alpha$ не показал ни заметной асимметрии, как было однажды ранее, ни уширения линии, но продолжительность свечения линии была примерно такая же, как и белой вспышки, что нетипично для M карликов.

Лин и др. (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 разнесёнными на 300 км телескопами и имела амплитуду 1.6.

С помощью камеры Томо-е Gozen, установленной на Kiso Schmidt телескопе Токийского университета, Айзава и др. (2022) провели за 40 часов наблюдений односекундный обзор вспышек M карликов. Они обнаружили 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 подъём и более плавный спуск, чем минутные кривые блеска с Кеплера, и имеют, как правило, плоский максимум. Полагая свечение вспышки как абсолютно чёрное тело с температурами 9000-15000 К, они нашли пиковые светимости 10^{29} - 10^{31} эрг/с и болометрические энергии 10^{31} - 10^{34} эрг. 90% родительских звёзд обнаружили по спектрам LAMOST эмиссию $H\alpha$ и средняя частота вспышек этих звёзд составила 0.7 событий в сутки. Авторы высказали предположение, что наблюдаемые кривые блеска можно объяснить с помощью модели сжатия в хромосфере: время нарастания в целом согласуется с альфвеновским временем прохождения магнитной петли масштабом 10^4 км и напряжённостью поля 1000 Гс, в то время как затухание определяется радиационным охлаждением сжатой хромосферы.

По одновременным рентгеновским (Chandra) и ультрафиолетовым (Hubble/STIS) наблюдениям Фурмайстер и др. (2022) исследовали температурную структуру короны и переходной области звезды Prox Cen и влияние этого излучения звезды на расположенную в её 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 ультрафиолете и до 30 в рентгене.

С помощью Hubble/COS Файнштейн и др. (2022) более 5 часов вели наблюдения молодой (22 млн лет) звезды AU Mic; в её пылевом диске находятся две экзопланеты, так что эта система идеальна для выяснения результатов облучения этих тел далёким ультрафиолетом, исходящим от звезды из слоя 10^4 - 10^7 К. Они обнаружили 13 вспышек с энергиями в диапазоне 10^{29} - 10^{31} эрг при амплитуде в континууме $\lambda < 1100 \text{ \AA}$ и оценили потерю массы звездой 10^8 г/с.

По архивным наблюдениям в 2015-2016 годы на ALMA (12 м) и АСА (1.33 мм) Бартон и др. (2022) впервые обнаружили на ϵ Eri три сильные вспышки в мм 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. Они нашли спектральный индекс в максимуме вспышки 1.81 и нижний предел линейной поляризации 0.08 ± 0.12 .

Кацова М.М. и др. (2022) показали, что при корректном учёте различных технологий наблюдений солнечных и звёздных вспышек различия в максимальных энергиях этих событий заметно уменьшаются и солнечные вспышки и супервспышки на солнцеподобных звёздах можно описать единой моделью зависимости активности от запятнённости.

Говард и др. (2022) сообщили о наблюдении в ходе многоволновой кампании уникальной вспышки Prox Cen 6 мая 2019 года. Наблюдения велись в миллиметровом, оптическом и мягком рентгеновском диапазонах и в мм она является, по-видимому, самой слабой зарегистрированной звёздной вспышкой. Её энергия в рентгене составила 10^{30} , в оптике 10^{28} эрг, корональная температура 11 МК и мера эмиссии 10^{50} см^{-3} . Миллиметровая светимость более, чем в сто раз выше, чем у солнечной вспышки X1, и длилась секунды, а не минуты, как у Солнца.

Алтукаир и Циклаури (2022) предложили и использовали программу на Python для автоматического обнаружения вспышек и поиска супервспышек на А-М звёздах главной последовательности во всех данных Кеплера, существенно расширив предыдущие исследования только G-звёзд лишь на части данных Кеплера. Они изучили статистические свойства частоты возникновения супервспышек и нашли, что на G-звёздах вспышки с энергией 10^{35} эрг происходят раз в 4360 лет. Они обнаружили 4637 супервспышек на 1896 G-карликах, 321, 1125, 4538 и 5445 супервспышек на 136, 522, 770 и 312 карликах А, 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 М, но 1.3 у А звёзд. Затем эти авторы привели случаи супервспышек на медленно вращающихся солнцеподобных звёздах, супервспышек с большими амплитудами на G и K звёздах главной последовательности и пришли к выводу, что медленное затухание вспышек соответствует малым энергиям вспышек, а быстрое – большим энергиям. (Алтукаир и Циклаури, 2023а). В следующей работе они рассмотрели F- и G-звёзды с периодами вращения менее 1 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. (Алтукаир и Циклаури, 2023б).

Джэкман и др. (2022) использовали оптические наблюдения на TESS и ультрафиолетовые наблюдения на GALEX вспышек на М карликах для оценки ультрафиолета, идущего от вспышек, зарегистрированных в оптике. В результате они нашли, что модель чёрнотельного излучения вспышки при температуре 9000 К, широко использовавшаяся для предсказания ультрафиолета по оптике, недооценивала энергию NUV GALEX в 6.5 раз и энергии FUV GALEX в 31 раза. Они нашли температуру вспышек от полностью конвективных М звёзд 10700 К и оценили роль уточнённого ультрафиолетового потока на биогенез экзопланет.

В той же координированной кампании Джэкман (2022) исследовал двойную М звезду Ross 733 в оптике и в области NUV на GALEX и в ультрафиолете на телескопе Swift и на последнем получили кривые блеска двух вспышек. По его оценке, в системе происходят вспышки с энергией 10^{33} эрг каждые полторы суток. Джэкман оценил температуру псевдоконтинуума на спаде 7340 К.

Брассёр и др. (2022) исследовали вспышки на G-звёздах в ближнем ультрафиолете – наблюдения на GALEXе - и в оптическом диапазоне - наблюдения на Кеплере. Отсутствие оптических вспышек во время таких событий в ультрафиолете накладывает верхний предел отношению излучений в этих полосах и ставит под сомнение оценки ультрафиолетового облучения экзопланет по оптическим наблюдениям вспышек звёзд.

На индийском космическом аппарате AstroSat Кузнецов и др. (2022) провели рентгеновские и ультрафиолетовые наблюдения двойной системы AT Mic, состоящей из двух М4.5е карликов. В течение 20 кс они обнаружили спокойное излучение системы и не менее пяти вспышек на разных компонентах. Рентгеновские вспышки обычно были длиннее и задерживались на 5 - 6 минут относительно ультрафиолетовых. Анализ полученных данных привёл 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 тяжёлых элементов в короне AT Mic в 3-5 раз ниже, чем в солнечной фотосфере, и увеличивалось во время вспышек, вероятно, за счёт испарения

хромосферы. Вспышки имели энергии $\sim 10^{31-32}$ эрг и магнитные поля сильнее, чем в типичных солнечных вспышках.

С помощью спутника CoRoT Соарес и др. (2022) на 69 К звёздах зарегистрировали 209 вспышек и оценили их чёрнотельные температуры 6400 ± 2800 К, а их энергии от 10^{32} до 10^{37} эрг. На холодном М карлике Trappist-1 с 7 экзопланетами Маас и др. (2022) зарегистрировали две вспышки в полосах g, r, i, zs. Чёрнотельные температуры вспышек оценены как 7940 и 6000 К, пиковые температуры – 13620 и 8290 К.

Штельцер и др. (2022) описали мощную вспышку AD Leo 19 ноября 2019 года, которая наблюдалась в рентгене и в оптике. 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 см²с⁻¹стер⁻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.

Васильев и др. (2022) предложили уточнённый метод отождествления вспышек на материалах панорамной фотометрии, позволяющий отсеять изображения, искажённые излучением фоновых источников: на первом этапе определяется характер рассеяния точки в системе и на втором этапе уточняются координаты изображения повышенной яркости. Они применили этот метод к 5862 звёздам главной последовательности и число заподозренных вспышек уменьшилось с 2274 до 342.

Си и др. (2023) обнаружили, что вспышки сильнее у более богатых металлами звёзд при фиксированной массе и периоде вращения.

Тристан и др. (2023) провели семидневную многоволновую кампанию мониторинга молодой активной M1e звезды AU Mic с экзопланетами и пылевым диском. От рентгена до оптики зарегистрировано 73 вспышки. Данные по NUV (GALEX) и с XMM-Newton использованы для эмпирического исследования эффекта Нойперта. 65% вспышек не показывают этот эффект, а там, где он есть, предложено 4 его версии.

Лиу и др. (2023) провели статистическое исследование 125 вспыхивающих звёзд, обнаруженных за два первых с 2020 года наблюдений с минутными экспозициями на LAMOST и TMTS. Большинство этих объектов – звёзды поздних типов с $G_{BP} > G_{RP} > 2.0$, но более голубые объекты обнаруживают более энергичные вспышки более широкого профиля. Максимальный поток во вспышке очень зависит от эквивалентной продолжительности вспышки, что согласуется с результатами по Кеплеру и Evryscope и напоминает свечение магнитных петель. Вспышки на более

горячих звёздах обнаруживают более сильную зависимость максимального потока от эквивалентной продолжительности вспышки. В спектрах вспыхивающих звёзд с LAMOSTa эмиссия H_α сильнее, чем у неактивных звёзд, но, считают авторы, хромосферная активность может быть не единственной причиной эмиссии.

Бойд и др. (2023) провели фотометрические и спектроскопические наблюдения EV Lac, и в 10 сеансах из 39 зарегистрировали вспышки с амплитудой более $0.^m1$. Анализ полученных данных привёл их к следующим выводам. Энергия вспышек в полосе В оценена как от $10^{30.8}$ до $10^{32.6}$ эрг, максимум излучения в континууме достигался раньше, чем в эмиссионных линиях водорода и гелия, а излучение в континууме падало быстрее, чем в линиях. В среднем 37% энергии в полосе В приходится на линии. Чёрнотельные температуры самых ярких вспышек составили 10590 и 19500 К. В максимуме блеска обнаружилось синее смещение.

Янг и др. (2023) предложили и рассчитали ряд одномерных гидродинамических моделей вторичных пиков на кривых блеска оптических вспышек М карликов: их причиной они считают свободно-свободное и свободно-связанное излучение конденсаций в петлях корональной плазмы.

Дидель и др. (2023) зарегистрировали с помощью XMM-Newton 21 рентгеновскую вспышку AB Dor и 13 из них детально проанализировали. Их амплитуды достигали $A_x = 34$, диапазон энергий 10^{34-36} эрг, длительности от 0.7 до 5.8 часов. Зарегистрированные спектры в спокойном состоянии представлены трёхтемпературной плазмой со средними температурами 0.29, 0.95 и 1.9 кэВ. Пиковая температура определена в пределах 31-89 МК, пиковая $ME = 10^{52.5-54.7}$ см⁻³. Имел место обратный FIP-эффект. Рентгеновские кривые блеска звезды демонстрировали вращательную модуляцию, длины полупетель определены в пределах $10^{9.9-10.7}$ см и минимальное магнитное поле 200-700 Гс.

Намизаки и др. (2023) на телескопах Seimei и TESS провели одновременные спектроскопические и фотометрические наблюдения супервспышки YZ CMi. Боллометрическая 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 Хамагучи и др. (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 жёстком диапазоне 2-4 кэВ кривые блеска показали типичный для звёздных вспышек быстрый подъём и медленное затухание, тогда как в мягком диапазоне 0.3 – 1 кэВ, особенно в первой вспышке, имели место протяжённые 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 расчётами корональных петель показало, что холодный компонент возникает в рентгеновской плазме вблизи основания магнитных петель, которые охлаждаются в основном теплопроводностью. Временное запаздывание соответствует времени прохождения испарённого газа через всю вспышечную петлю. Меньшая мера эмиссии холодного компонента по сравнению с расчётами наводит на мысль о подавлении теплопроводности возможным увеличением поперечного сечения петли или флуктуациями турбулентности.

Исследования показали, что длительность солнечных и звёздных вспышек коррелирует с интенсивностью события на некоторых длинах волн таких, как белый свет, но не мягкий рентген, и не известно почему. В работе Рипа и Айрапетяна (2023) использована программа радиативной гидродинамики для выяснения факторов, влияющих на длительность вспышечной эмиссии в разных длинах волн. Оказалось, что длительность зависит от температуры плазмы, высоты атмосферы, относительной важности радиативного охлаждения, теплопроводности, изменения энтальпии. Они нашли явные различия между эмиссией, которая формирует нижнюю атмосферу и непосредственно отвечает за нагрев, и эмиссией, которая формируется в короне, косвенно отвечая за индуцированный нагрев хромосферного испарения. Полученные результаты Рип и Айрапетян применили к энергетике вспышек.

По данным TESS Кумбхакар и др. (2023) у молодого коричневого (M7.0) карлика МНО~4 в области звёздообразования в Тельце определили период вращения 2.224 суток и зарегистрировали две супервспышки с болометрической энергией 10^{34-35} эрг.

На телескопе AstroSat Сайрам и др. (2023) исследовали внешние атмосферы четырёх быстро вращающихся звёзд AB Dor, BO Mic, DG CVn и GJ 3331 и на первых трёх из них зарегистрировали вспышки в рентгене и на двух – в ультрафиолете.

Ноцу и др. (2023) провели одновременные оптические спектроскопические и фотометрические наблюдения YZ CMi, EV Lac и AD Leo в течение 31 ночи. 7 из 41 зарегистрированной вспышки показали синюю

асимметрию в профиле линии H_{α} на величину 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 напряжённость 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 между массой вспышки и солнечной СМЕ.

Используя данные Chandra и Gaia 3, Жао и др. (2023) провели статистический анализ вспышек в мягком рентгене солнцеподобных звёзд. Выборка из 129 вспышек на 103 звёздах 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.

Кармакар и др. (2024) зарегистрировали на обсерватории AstroSat 5 рентгеновских и ультрафиолетовых вспышек на SS Eri и AB Dor. Пиковые рентгеновские светимости находились в пределах 10^{31-33} эрг/с. Спектральный анализ указывал на наличие трёх- и четырёхтемпературной короны у SS Eri и AB Dor соответственно. Максимальные температуры составляли 51-59 МК у SS Eri и 29-44 МК у AB Dra, а меры эмиссии 10^{54} и 10^{55} см⁻³ соответственно. Отмечено повышенное содержание металлов во время вспышек.

Иноуз и др. (2024) провели четыре ночи наблюдений EV Lac на пяти инструментах: в мягком рентгене, в ближнем ультрафиолете, в оптике 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, смещённый примерно на 100 км/с в синюю сторону. Авторы интерпретируют это как запоздалый протуберанец. Соотношение потоков в ближнем ультрафиолете и в белом свете соответствует чёрнотельной температуре < 9000 К или максимальному потоку энергии пучка нетепловых электронов менее $5 \cdot 10^{11}$ эрг/см²с.

Следует напомнить, что о чёрнотельном излучении звёздных вспышек в предыдущие годы уже писали МакГрегор и др. (2021), Соарес и др. (2022), Маас и др. (2022), Джэкман и др. (2022), Бойд и др. (2023) и лишь последние авторы приводят температуру одной из вспышек 19500 К, тогда как у другой вспышки – 10500 К, и величины около 10000 К – все оценки всех остальных исследователей. Однако, используя оригинальный колориметрический подход, ещё в начале 10-х годов Ловкая (2014) уверенно показала, что звёздные вспышки излучают чёрнотельно только вблизи максимума блеска и при этом их температуры близки к 20000 К. К

сожалению, все работы Маргариты Николаевны были опубликованы на русском языке и остались неизвесны иностранным коллегам. Недавно новые аргументы против широкого применения чернотельной модели излучения звёздных вспышек были приведены Симойнсом и др. (2024).

8. МАГНИТНЫЕ ПОЛЯ

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

Кочухов и др. (2020) провели магнитометрию звёзд солнечного типа с помощью измерения усиления спектральных линий магнитным полем. Этот метод отличается от наиболее распространённой магнитометрии по спектрополяриметрическим наблюдениям тем, что в нём измеряется суммарный магнитный поток по модулям локальных компонентов поля, тогда как спектрополяриметрические сигналы разных знаков взаимно погашаются, что при многочисленности малых магнитных структурах 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, Кочухов и др. 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 трём 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 звёздах моложе 120 миллионов лет до 0.2-0.8 кГс у более старых звёзд, обнаружили антикорреляцию среднего поля и периода вращения или числа Россби и дали калибровку $V_f(Ro)$. Кочухов и др. пришли к выводу, что все рассмотренные звёзды имеют поля с напряжённостью $B \approx 3.2$ кГс, а рост величины V_f обусловлен увеличением фллинг-фактора от 10% до 50% поверхности звезды с ростом активности. Исследованные ими звёзды обнаружили чёткую корреляцию среднего магнитного поля с индексами корональной и хромосферной активности L_X/L_{bol} и IgR'_{HK} соответственно. При сравнении полученных данных с результатами спектрополяриметрической магнитометрии они оценили, что последняя даёт около 1% общей энергии магнитного поля у самых активных звёзд и около 0.01% у наименее активных. Напомним, что ранее Джонс-Крулл и Валенти (1996) провели магнитометрию по уширению спектральной линии нейтрального железа одного из самых активных красных карликов EV Lac.

Райнерс и др. (2022) представили измерения усреднённых по поверхности магнитных полей 292 М карликов, полученные более чем по 15000 спектрам высокого разрешения. Они обнаружили связь между средней напряжённостью поля и числом Россби, напоминающую зависимость вращение-активность, и нашли, что среди медленно вращающихся звёзд магнитный поток пропорционален периоду вращения, а среди быстрых ротаторов среднее поверхностное поле незначительно превышает уровень, установленный доступной кинетической энергией. Далее, они нашли тесную связь между нетепловым корональным рентгеновским излучением, хромосферным излучением в линиях водорода и кальция и магнитным потоком. Взятые вместе, эти соотношения показывают, что соотношение вращение-активность можно проследить до зависимости магнитного поля от вращения. Кальциевая эмиссия насыщается при средней напряжённости поля 800 Гс, тогда как H_α и рентген растут с более сильными полями у более быстрых ротаторов.

Практически общепринято, что вспышки и корональные выбросы массы на Солнце и на звёздах черпают энергию из запасённой в корональных магнитных полях, где они генерируются механизмами динамо. Но остаётся открытым вопрос, снабжение магнитного поля энергией происходит непосредственно или передающими токами. В связи с этим Селигман и др. (2022) рассмотрели распределения интенсивностей в выборке около 105 вспышек звёзд ГП, зарегистрированных TESS и показавших степенное распределение, как на Солнце, хотя с разными показателями. Они исследовали механизмы, требуемые для степенного распределения вспышек через прямую энергию токов, расширили модель, включив силы Кориолиса, что существенно для более быстрых ротаторов, и привели предварительные соображения для предсказанной корреляции вращение – степенной индекс.

Браун и др. (2022) представили измерения звёздной хромосферной активности R'_{HK} и/или усреднённого по поверхности продольного магнитного поля B_l у 954 звёзд от среднего F до среднего 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-доплеровой визуализации. Хромосферная активность, изменчивость активности и напряжённость тороидального поля уменьшаются на ГП по мере замедления вращения. У G-звёзд исчезновение доминирующих тороидальных полей происходит при том же уровне хромосферной активности, что и изменение соотношений между хромосферной активностью, изменчивостью активности и средней напряжённостью поля.

Кочухов, Хэкман и Лехтинен (2023) разработали процедуру диагностики магнитного поля, основанной на магнитном усилении линий атомов железа в оптическом диапазоне, расширив её от измерения одного среднего значения напряжённости поля до одновременной реконструкции доплеровских изображений двумерных карт температуры и напряжённости магнитного поля, и применили этот новый метод к двум наборам спектроскопических данных молодой солнцеподобной звезды LQ Hydra. В обе эпохи они обнаружили равномерное распределение напряжённости магнитного поля, за исключением широтного тренда увеличения напряжённости от 1.5-2.0 кГс на низких широтах до 3.0-3.5 кГс вблизи полюсов вращения. Такое распределение мелкомасштабного поля не обнаруживает чёткой корреляции с расположением температурных пятен или глобальной структурой магнитного поля.

В 2019 - 2022 годы на канадско-французско-гавайском телескопе Леманн и др. (2023) провели наблюдения шести медленно вращающихся М 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 звёзды показали крупномасштабные изменения магнитных полей на временной шкале их периодов вращения, смену магнитной полярности GJ 1151 и возможно GJ 905. Четыре полностью конвективных М карлика обнаружили большее число временных вариаций, чем два частично конвективных. Все шесть М карликом продемонстрировали крупномасштабную напряжённость поля от 20 до 200 Гс, как у значительно более быстрых ротаторов.

В ту же кампанию Донати и др. (2023a) провели исследование в ближнем ИК диапазоне крупно- и мелкомасштабное магнитного поля и экзопланет молодого М карлика AU Mic. Обе сигнатуры поля модулируются вращением звезды с периодом 4.86 суток. Мелкомасштабное поле оценивается по уширению спектральных линий и достигает 2.51кГс. 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 позволили оценить их массы в 10 и 14 масс Земли.

Донати и др. (2023b) исследовали магнитные поля и вращения 43 слабо и умеренно-активных М карликов по наблюдениям в 2019-2022 годы на SPIRou, установленном на канадско-французско-гавайском телескопе. Они использовали 6700 спектров с круговой поляризацией для исследования продольного магнитного поля и обнаружили поле на 40 звёздах и надёжные или предварительные периоды вращения на 38 звёздах; найденные периоды у

ранних М карликов составляют от 14 до более 60 суток, у большинства средних и поздних М карликов – от 70 до 200 суток. Донати и др. нашли, что напряжённость 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 звёзд.

Из той же команды Донати Кристофари и др. (2023) представили результаты анализа мелкомасштабных магнитных полей М карликов, измеренных в 2019-2022 годы на установленном на канадско-французско-гавайском 3.6 м телескопе приборе SPIRou – спектрополяриметра высокого разрешения для ближней ИК области. Они сосредоточились на 44 слабо и умеренно активных М карликах, получили среднюю напряжённость 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 чётких 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 звёздах.

Беллотти и др. (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 с SPIRом в 2019-2020 годы и архивные оптические данные с двух специализированных спектрополяриметров на Гавайях и в Верхнем Провансе в 2006-2019 годы, неполяризованные профили Стокса и другие источники. В результате они 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 намёки 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.

Бай и др. (2023) провели 146-часовой фотометрический мониторинг AD Leo на GWAC-F30 и 528 часов патрулирования её 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 звёзд Халин и др. (2023) проанализировали зеэмановское уширение шести магниточувствительных и нечувствительных линий нейтрального железа в инфракрасной полосе Н для измерения мелкомасштабных магнитных полей, используя моделирование переноса поляризованного излучения и отклонения НЛТЕ. В результате они нашли среднюю напряжённость магнитного поля в диапазоне от 0.4 до <0.1 кГс и что мелкомасштабные поля коррелируют с крупномасштабными полями. При сравнении этих NIR и оптических измерений обнаружилось превышение оптических результатов в 2-3 раза.

Амазо-Гомез и др. (2023) провели многоволновую кампанию по зондированию магнетизма молодой солнцеподобной звезды ι Nor от фотосферы до короны. Они представили результаты многолетнего спектрополяриметрического мониторинга с помощью сверхстабильного прибора HARPS на 3.6 м телескопе ESO, высокоточные данные с TESS, наблюдения в ближнем и дальнем ультрафиолете на телескопе Хаббла. В результате они надёжно определили период вращения звезды. Анализируя градиент спектра мощности кривых блеска TESS, Амазо-Гомез и др. смогли оценить отношение чисел пятен и факелов и пришли к выводу, что во время наблюдений на звёздной поверхности преобладали пятна, они впервые сравнили свойства фотосферной активности, полученной методом G_{PS} и методом Зеэмана-Доплера, а усиление линий CIV и CIII по спектрам с телескопа Хаббла интерпретировали как свидетельство вспышки.

С целью выяснения взаимодействия двойственности и магнетизма в тесных двойных системах Цветкова и др. (2023) рассмотрели двойную систему FK Aqr, состоящую из двух ранних M карликов и уже известную как вспыхивающая и имеющая компоненты с массам чуть выше полностью конвективной структуры. Они 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 звёзд.

Бхатиа и др. (2023) рассмотрели некоторые вопросы работающей в зоне конвекции небольшой динамо-машины – так называемого «магнитного ковра» - как альтернативу теории среднего поля. Они исследовали распределение этих полей и их влияние на характеристики интенсивности, скорости и пространственного распределения кинетической и магнитной энергии в нижней фотосфере звёзд спектральных типов F3V, G2V, K0V и

M0V с использованием трёхмерного радиационного излучения. Напряжённости поля на поверхности $\tau = 1$ во всех случаях весьма схожи. Звезда M0V показала самые сильные поля, а звезда F3V – самое сильное давление газа. Все звёзды показали избыток горизонтального поля по отношению к вертикальному полю средней фотосферы, и этот избыток растёт к поздним спектральным типам. Эти поля приводят к уменьшению скорости восходящего потока и к небольшому уменьшению размеров гранул

Браун и др.(2024) проанализировали возможное влияние экзопланеты на вариации магнитного поля звезды-хозяйки V889 Her: по картам магнитного поля в 14 эпох в 2004-2019 годы: оно 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

9. ЦИКЛИЧНОСТЬ И ЭВОЛЮЦИЯ АКТИВНОСТИ

Кацова (2020) опубликовала краткий обзор наблюдательных результатов, лежащих в основе современных идей по эволюции звёздной активности. Основные законы, полученные из соотношений вращение-возраст и активность-вращение, позволяют проследить, как активность звёзд малых масс изменяется с возрастом во время нахождения звезды на ГП, и сопоставить свойства активности звёзд и молодого Солнца. Совместно рассматриваются различные индикаторы активности, вращения и магнитных полей солнцеподобных звёзд разного возраста, определяются периоды вращения, когда режим насыщенной активности сменяется режимом ненасыщенной активности, что для активности солнечного типа у G и K звёзд 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 далёкий 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 напряжённости магнитного поля. В целом, эволюция активности следует поведению углового момента звезды, а после 100-250 млн лет магнитные поля тесно коррелируют с вращением.

Лун и др. (2022) исследовали HD 166620, которая несколько старше и менее активна, чем Солнце, – звезду, у которой в рамках HR-проекта по линиям CaII был уверенно определён цикл активности в 17 лет, а по наблюдениям в 20-годы нашего века на снимках с Кек телескопа не

наблюдалась переменность, что позволило отнести её в кандидаты в состояние минимума Маундера.

Бондарь и Кацова (2022) исследовали циклическую переменность солнечного аналога VE Set 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 $0.^m02$. Кратковременные вариации блеска за счёт вращательной модуляции происходят с увеличением амплитуды до $0.^m05$ вблизи минимума цикла.

Увеличив оптические ряды до превышения 50 лет, собрав рентгеновские данные и данные по инфракрасному триплету кальция, Фурмайстер и др. (2023) подтвердили ранее известный 3-летний цикл активности молодой вспыхивающей звезды ϵ Eri, уточнили 11-летний цикл и заподозрили существование 34-летнего цикла.

Согласно наблюдениям, быстро вращающиеся молодые звёзды показывают высокий уровень активности без больших минимумов типа Маундера и редко показывают плавные регулярные циклы активности. С другой стороны, медленно вращающиеся старые звёзды имеют низкий уровень активности и плавные циклы. Авторы (????) впервые попытались смоделировать эти наблюдения, используя модели динамо переноса потока и строя кинематические модели динамо звезды солнечной массы с разными скоростями вращения. Дифференциальное вращение и меридиональная циркуляция задавались гидродинамической моделью среднего поля. В результате были получены модели, соответствующие указанным выше наблюдениям.

Согласно Меткалфу и др. (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 звёздным динамо. Они оценили магнитное эволюционное состояние звезды, её ветровой тормозной момент, который явно помещает её в режим, обусловленный изменениями скорости потери массы.

10. ЭКЗОПЛАНЕТЫ

Анализируя наблюдения на TESS четырёх мощных и продолжительных вспышек на полностью конвективных карликах, по модуляции их блеска быстрым вращением звёзд Ильин и др. (2021) оценили их широты между 55

и 81° , что по их мнению делает несущественным влияние такой звёздной активности на экзопланеты.

Штельцер и др. (2022) рассмотрели 112 М карликов ярче $11.^m5$, у которых TESS может исследовать всю обитаемую зону; располагая 1276 кривыми блеска с двухминутными экспозициями, они зарегистрировали более 2500 вспышек и, используя известное соотношение между излучением вспышек в оптике и рентгене, оценили потоки энергии на экзопланеты в этих двух диапазонах. Они изучили зависимость вспышек от вращения, амплитуды от длительности и распределение частот вспышек по энергии, то есть их энергетический спектр. Но только у 12 звёзд были найдены периоды вращения.

Клайн и др. (2022) проанализировали годичный мониторинг спектрографом HARPS звезды-хозяйки экзопланет AU Mic и определили полуамплитуды их лучевых скоростей 5.8 ± 2.5 и 8.5 ± 2.5 м/с у AU Mic b и c соответственно. Они выполнили независимое измерение полуамплитуды лучевой скорости AU Mic c с одновременным учётом наведённой активностью дисторсией и обусловленными планетой сдвигами. Результирующая полуамплитуда в 13.3 ± 4.1 м/с усиливает идею об удивительно высокой центральной плотности AU Mic c, повышается филлинг-фактор пятен и понижается уровень дифференциального вращения, то есть за год произошли заметные изменения уровня магнитной активности звезды. Кроме того, они сообщили об обнаружении на уровне 3 σ модуляции гелиевого дублета на 8.33 ± 0.04 сутках, что близко к орбитальному периоду AU Mic b в 8.46 суток.

Лойд и др. (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 радиус Земли и периодом обращения 2.6 суток. Наблюдения охватывают три эпохи в 2012-2018 годы, 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 ± 3 %; это нижнее значение эффекта вспышек, так как самые слабые – из-за конечной чувствительности – и самые сильные – из-за их редкости – не регистрируются. Максимальная амплитуда $A_{\text{FUV}} = 25$. Незначительное увеличение излучения FUV с фазой орбиты соответствует полю планеты менее 100 Гс.

Кроликовски и др. (2023) детально рассмотрели интенсивность и переменность чувствительного к активности звезды триплета гелия $\lambda 10830 \text{ \AA}$ для оценок характеристик экзосфер у экзопланет молодых звёзд. Исследование выполнено по временным рядам спектров молодых хозяев

транзитных экзопланет. Они пришли к выводу о повышенной плотности молодых хромосфер и о заселении метастабильного уровня гелия столкновениями. Вспышки и изменения поверхности звёзд приводят к изменению свечения триплета гелия, максимальная переменность имеет место у самых молодых звёзд и ослабевает после 300 млн лет.

Пиллиттери и др. (2023) сравнили рентгеновское излучение активных F5-звёзд 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 её рентгеновская светимость находится на уровне, типичном для одновозрастных F-звёзд в Гиадах. 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 яркой в рентгене короны либо звезда вошла в минимум активности типа Маундера.

Пинедра и Вилладсен (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 YZCet b, что указывает на повышенную вероятность индуцирования звёздного излучения экзопланетой.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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

Как это ни удивительно, но открывший вспыхивающие красные карлики Герцшпрунг сто лет назад и исследователи наших дней использовали в принципе одну и ту же методику – панорамную фотометрию. То, что у Герцшпрунга был 10-дюймовый телескоп в Южной Африке, а сейчас такие работы ведутся на космических обсерваториях Кеплер и TESS – дело в вековом прогрессе техники. Значит, начинающему исследователю надо не только исполнять конкретные поручения своего руководителя, но и интересоваться историей вопроса.

Наиболее перспективны одновременные наблюдения в разных диапазонах спектра. Значит, надо стремиться участвовать в кампаниях с широкой кооперацией разнородных наблюдателей.

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

ЛИТЕРАТУРА

Айзава и др. (Aizawa M., Kawana K., Kashivana K., Ohsawa R., Kawahara H., Naokawa F., Tajiri T.), 2022 – arXiv:2206.12847. PAS Japan, V. 74, Is. 5, pp.1069-1094.

Айрапетян и др. (Airapetian V.S., Jin M., Lueftinger T., Boro Saitkia S., Kochukhov O., Guedel M., Van Der Holst B., Manchester IV W.), 2021 – arXiv:2106.01284. *Astrophys. J.* V. 916, Is. 2, id.96, 15 pp.

Алварато-Гомез и др. (Alvarado-Gomez J.D., Cohen O., Drake J.J., Frascetti F., Poppenhäger K., et al.), 2022 – arXiv: 2202.07949. *Astrophys. J.*, V. 928, Is. 2, id.147, 12 pp.

Алексеев И.Ю. и Гершберг Р.Е., 2021 – Известия КрАО Т.117 №1 С.44.

Алексеев И.Ю. и Кожевникова А.В., 2017 - *Астрономический журнал* Т. 61, No. 3, С.240.

Алексеев И.Ю. и Кожевникова А.В., 2018 – *Астрономический журнал* Т. 62, No. 6, С.421.

Алтукаир и Циклаури (Althukair A.K. and Tsiklauri D.), 2022 – arXiv:2212.10224. *Res. Astron. Astrophys.* V. 23, Is. 8, id.085017, 21 pp.

Алтукаир и Циклаури (Althukair A.k. and Tsiklauri D.), 2023a – arXiv:2306.02292. *Res.Astron. Astrophys.* V. 23, Is.10, id.105010, 16 pp.

Алтукаир и Циклаури (Althukair A.k. and Tsiklauri D.), 2023b – arXiv:2307.04038. *Res.Astron.Astrophys.* V. 23, Is. 11, id.115015, 11 pp.

Амазо-Гомес и др. (Amazo-Gomez E.M., Alvarado-Gomez J.D., Poppenhäger K., Hussain G.A.J., Wood B.E., Drake J.J., do Nascimento J.-D., Anthony F. et al.), 2023 – arXiv:2307.01744. *Monthly Notices RAS* V.524, Is.4, pp.5725-5748

Араужо и Валио (Araujo A. and Valio A.), 2023 – arXiv:2303.16051. *Monthly Notices RAS Let.*, V. 522, Is. 1, pp.L16-L20.

Бартон и др. (Burton K., MacGregor M.A., Osten R.A.), 2022 - arXiv:2210.10818. *Astrophys. J. Let.* V. 939, Is. 1, id.L6, 8 pp.

Бай и др. (Bai J.-Y., Wang J., Li H.-L., Xin L.-P., Li G.-L., Yang Y.-G., Wei J.-Y.), 2023 – arXiv:2307.02789. *PASP*, V. 135, Is. 1048, id.064201, 9 pp.

Бастиан и др. (Bastian T., Cotton B., Hallinan G.), 2022 – arXiv:2206.14099. *Astrophys. J.*, V. 935, Is. 2, id.99, 16 pp.

Беллотти и др. (Bellotti S., Morin J., Lehmann L.T., Folsom C.P., Hussain A.J., Petit P., Donati J.-F. et al.), 2023 – arXiv:2307.01016. *Astron. Astrophys.* V. 676, id.A56, 26 pp.

Бескин и др. (Beskin G., Karpov S., Plokhotnichenko V., Stepanov A., Tsap Y.), 2017 – *PAS Australia* V.34 e010, 12p.

Бич и др. (Bicz K., Falewicz R., Pietra M., Siarkowski M., Pres P.), 2022 – arXiv:2206.11611. *Astrophys. J.*, V. 935, Is. 2, id.102, 21 pp.

Блот и др. (Blot S., Callingham J.R., Vedantham H.K., Kavanagh R.D., Pope V.J.S., Climent J.B., Guirado J.C. et al.), 2023 – arXiv:2312.09071.

Бойд и др. (Boyd D., Buchheim R., Curry S., Parks F., Shank K., Sims F., Walker G. et al.), 2023 – arXiv:2304.08578. *The Journal of the American Association of Variable Star Observers*, V. 51, # 1, p. 14

Бойл и Бума (Boyle A.W. and Bouma L.G.), 2022 – arXiv:2211.09822. *Astron. J.*, V. 166, Is.1, id.14, 32 pp.

Бондарь Н.И. и Кацова М.М., 2022 – *Геомагнетизм и аэрономия* Т.62 №7 С..919.

Боро Сайкия и др. (Boro Saikia S., Lueftinger., Airapetian V.S., Ayres T., Bartel M., Guedel M. et al.), 2023 – arXiv:2304.02667. *Astron. J.* V. 166, Is. 1, id.14, 32 pp.

Брассёр и др. (Brasseur C.E., Osten R.A., Tristan I. I., Kowalski A.F.), 2022- arXiv:2212.08696. *Astrophys. J.*, V. 944, Is. 1, id.5, 24 pp.

Браун и др. (Brown A., Schneider P.C., France K., Froning C.S., Youngblood A.A. et al.), 2023 – arXiv:2303.12929.

Браун и др. (Brown E.L., Jeffers S.V., Marsden S.C., Morin J., Boro Saikia S., Petit P., Jardine M.M. et al.), 2022 – arXiv:2205.03108. *Monthly Notices RAS*, V. 514, Is. 3, pp.4300-4319.

Браун и др. (Brown E.L., Marsden S.C., Jeffers S.V., Heitzmann A., Barnes J.R., Folsom C.p.), 2024 – arXiv:2401.12408.

Бхатиа и др. (Bhatia T.S., Cameron R.H., Peter YH., Solanki S.K.), 2023 – arXiv:2311.02286.

Васильев и др. (Vasilyev V., Reinhold T., Shapiro A.I., Krivova N.A., Usoskin I., Montet B.T., Solanki S.K., Gizon L.), 2022 – arXiv:2209.13903.

Вашишт и др. (Vashishth V., Karak B., Kitchatinov L.), 2023 – arXiv:2304.05819. *Monthly Notices RAS*, V.522, Is. 2, pp.2601-2610

Вебб и др. (Webb S., Flynn C., Cooke J., Zhang J., Mahabal A., Abbott T.M.C., Allen R. et al.), 2021 – arXiv:2106.13026. *Monthly Notices RAS*, V. 506, Is. 2, pp.2089-2103.

Верониг и др. (Veronig A.M., Odert P., Leitzinger M., Dissauer K., Fleck N.C., Hudson H.S.), 2021 – *Nature Astronomy* V.5 P.697.

Вуд и др. (Wood B.E., Meuller H.-R., Redfield S., Konow F., Vannier H., Linsky J.L., Youngblood A., Vidotto A., Jardine M., Alvarado-Gomez J.D., Drake J.J.), 2021 – arXiv: 2105.00019. *Astrophys. J.*, V. 915, Is.1, id.37, 21 pp.

Герцшпрунг (Hertzsprung E.), 1924 – *Bull. Astron. Inst. Netherlands* V.2 P.87.

Гершберг Р.Е., Клиорин Н.И., Пустильник Л.А., Шляпников А.А., 2020 – «Физика звёзд средних и малых масс с активностью солнечного типа». Москва, Физматлит С.768.

Гетман и Фейгельсон (Getman K.V. and Feigelson E.D.), 2021 – arXiv:2105.04768. *Astrophys.J.*, V. 916, Is.1, id.32, 27 pp.

Говард и др. (Howard W.S., MacGregor M.A., Osten R., Forbich J., Cranmer S.R., Tristan I. et al.), 2022 – arXiv:209.05490.

Да Сильва и др. (da Silva J.G., Bensabat A., Monteiro T., Santos N.C.), 2022 – arXiv:2210.06903). *Astron. Astrophys.*, V. 668, id.A174, 25 pp.

Джозеф и др. (Joseph W.M., Stelzer B., Magaudda E., Martinez T.V.), 2024 – arXiv:2401.17287.

Джонс-Крулл и Валенти (Johns-Krull C.M. and Valenti J.A.), 1996 – *Astrophys.J.* V.459 L95.

Джонсон и др. (Johnson L.J., Norris C.M., Unruh Y.C., Solanki S.K., Krivova N., Witzke V., Shapiro A.I.), 2021 – arXiv: 2104.11544. *Monthly Notices RAS*, V. 504, Is.4, pp.4751-4767

Джэкман (Jackman J.G.), 2022 – arXiv:2210.15692. *Monthly Notices RAS*, V.517, Is. 3, pp.3832-3837

Джэкман и др. (Jackman J.G., Shkolnik E., Million C., Fleming S., Richev-Yowell T., Loyd P.), 2022 – arXiv:2210.15688. *Monthly Notices RAS*, V. 519, Is. 3, pp.3564-3583.

Джэкман и др., (Jackman J.A.G., Shkolnik E., Loyd R.O.P.), 2021 – arXiv: 2101.07269. *Monthly Notices RAS*, V. 502, Is. 2, pp.2033-2042

Ди Майо и др. (Di Maio C., Petralia A., Micela G., Lanza A.F., Rainer M., Malavolta L., Benatti S., Affer L. et al), 2023

Ди Мауро и др. (di Mauro M.P., Reda R., Mathur S., Garcia R.A., Buzasi D.L., Corsaro E. et al.), 2022 – arXiv:2209.12752. *Astrophys. J.*, V. 940, Is. 1, id.93, 13 pp.

Дидель и др. (Didel S., Pandey J.C., Srivastava A.K., Singh G.), 2023 – arXiv:2310.13416. *Monthly Notices RAS*, V. 527, Is. 2, pp.1705-1721

Дистефано и др. (Distefano E., Lanzafame A.C., Brugaletta E., Holl B., Lanza A.F., Messina S, Pagano I., Audard M. et al.), 2022 – arXiv: 2206.05500. *Astron. Astrophys.*, V.674, id.A20, 29 pp.

Дойл и др. (Doyle J.G., Irawati P., Kolotkov D.Y., Ramsay G. Nhalil N.V., Dhillon V.S., et al.), 2022 – arXiv: 2206.08070. *Monthly Notices RAS*, V. 514, Is. 4, pp.5178-5182.

Донати и др. (Donati J.-F., Cristofari P.I., Finociety B., Klein B., Moutou C., Gaidos E., Cadieux C., Artigau E. et al.), 2023a – arXiv:2304.09642. : *Monthly Notices RAS*, V. 525, Is. 1, pp.455-475.

Донати и др. (Donati J.-F., Lehmann L.T., Cristofari P.I., Fouque P., Moutou C., Charpentier P., Ould-Elhkim M. et al.), 2023b – arXiv:2307.14190. *Monthly Notices RAS*, V. 525, Is. 2, pp.2015-2039

Дуввур и др (Duvvuri G.M., Pineda J.S., Berta-Thompson Z.K., France K., Youngblood A.), 2022 – arXiv:2210.09353. *Astron. J.* V. 165, Is. 1, id.12, 18 pp.

Е и др. (Ye L., Bi S., Zhang J., Chen X., Sun T., Long L., Ge Z., Li T. et al.), 2024 – arXiv:2401.15438.

Жанг др. (Zhang J., Tian H., Zarka P., Louis C.K., Lu H., Gao D., Sun X. et al.), 2023 – arXiv:2306.00895. *Astrophys. J.*, V. 953, Is. 1, id.65, 19 pp.

Жанг и др. (Zhang W., Zhang J., He H., Song Z., Luo A., Zhang H.), 2022 – arXiv:2209.15255. *Astrophys.J. Suppl. Ser.*, V. 263, Is. 1, id.12, 18 pp.

Жао и др. (Zhao Z., Hua Z., Cheng X., Li Z., Ding M.), 2023 – arXiv:2312.12378.

Зик и др. (Zic A., Murphy T., Lynch C., Heald G., Lenc E. et al.), 2020 – arXiv: 2012.04642. *Astrophys. J.* V.904 P.237.

Икута и др. (Ikuta K., Namekata K., Notsu Y., Maehara H., Okamoto S., Honda S., Nogami D., Shibata K.), 2023 – arXiv:2302.09249. *Astrophys. J.* V.948 P.641.

Ильин и др. (Ilin E., Poppenhäger., Schmidt S.J., Jaervinen S.P., Newton E.R., Alvarado-Gomez J.D., Pineda J.S., Davenport J.R.A., Oshagh M., Ilyin I.), 2021- arXiv: 2108.01917. *Monthly Notices RAS* V.507 P.1723.

Ильин и др. (Ilin E., Poppenhäger K., Alvarado-Gomez J.D.), 2021 – arXiv:2112.09676. AN

Ильин и др. (Ilin E., Schmidt S.J., Poppenhäger., Davenport J.R.A. et al.), 2020 – arXiv: 2010.05576v1 12 Oct 2020. *Astron.Astrophys.* V.645 P.421.

Ильин и Поппенхэгер (Ilin E. and Poppenhäger K.), 2022 – arXiv:2204.14090. *Monthly Notices RAS*, V.513, Is. 3, pp.4579-4586.

Иноуэ и др. (Inoue S., Enoto T., Namekata K., Notsu Y., Honda S., Maehara H., Zhang J. et al.), 2024 – arXiv:2401.00399.

Иоаннидис и Шмитт (Ioannidis P. and Schmitt J.H.M.M.), 2020 – arXiv: 2010.16273. *Astron.Astrophys.* V.644 P.261.

Каванаг др.(Kavanagh R.D., Vidotto A.A., Klein B., Jardine M.M., Donati J.-F., Fionnagain D.O.), 2021 – arXiv: 2104.14457. *Cambridge workshop 20.5* P.315.

Као и Пинсонно (Cao L. and Pinsonneault M.H.), 2022 – arXiv:2209.10549. *Monthly Notices* V.517 P.2165.

Карамазца и др. (Caramazza M., Stelzer B., Magaudda E., Raetz S., Guedel M., Orlando S., Poppenhäger K.), 2023 – arXiv:2305.14971. *Astron.Astrophys.* V.565 P.14.

Кармакар и др. (Karmakar S., Naik S., Pandey J.C., Savanov I.S.), 2021 – arXiv:2111.07527v1 15 Nov 2021. *Monthly Notices RAS* V.509 P.3247.

Кармакар и др. (Karmakar S., Pandey J.C., Rawat N., Singh G., Shedge R.), 2024 – arXiv:2401.00117.

Кармона и др. (Carmona A., Delfosse X., Bellotti S., Cortes-Zuleta P., Ould-Elhkim M., Heidari N., Mignon L. et al.), - 2023- arXiv:2303.16712. *Astron.Astrophys.* V.674 P.110.

Кацова (Katsova V.V.), 2020 – arXiv:2010.12922. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics V/211 art.id. 105456.

Кацова и др. (Katsova M.M., Obridko V.N., Sokoloff D.D., Livshits I.M.), 2022 – Astrophys.J. V.936 P.49.

Кацова М.М., 1990 – Астрон.журнл Т.67 С.1219.

Кацова М.М., Низамов В.А., Шляпников А.А., 2022 – arXiv:2212.10142. Geomagnetism and Aeronomy, V.62 Is.7 P.903-910.

Кичатинов Л., 2022 – arXiv:2205.09952. Res.Astron.Astrophys. V.22 Is.12 id.125006 13 pp.

Клайн и др. (Klein B., Zicker N., Kavanagh R.D., Nielsen L.D., Aigrain S., Vidotto A.A., Barragan O. et al.), 2022 – arXiv: 2203.08190. Monthly Notices RAS V.512 P.5067.

Коваль А.Н.и Окс Е.А.,1983 – Известия КрАО Т.67 С.90.

Ковари и др. (Kovari Zs., Strassmeier K.G., Kriskovics L., Olah K., Borkovits T., Radvanyi A., Granzer T. et al.), 2023 – arXiv:2312.08416.

Коллер и др. (Koller F., Leitzinger M., Temmer M., Odert P., Beck P.G., Veronig A.), 2020 – arXiv:2012.00786. Astron.Astrophys. V.646 P.34.

Коффаро и др. (Coffaro M., Stelzer S., Кочухов О.), 2022 - arXiv: 2202.05563. Astron.Astrophys. V.661 P.79.

Кочухов и др. (Kochukhov O., Nachman T., Lehtinen J.J., Wehrhahn A.), 2020 – Astron.Astrophys. V.635 P. 142.

Кочухов, Хэкман и Лехтинен (Kochukhov O., Hackman T. and Lehtinen J.J.), 2023 – arXiv:2312.04136. Astron.strophys. V.680 L.17.

Кристофари и др. (Cristofari P.I., Donati J.-F., Moutou C., Lehmann L.T., Charpentier P., Fouque P., Folsom C.P. et al.), 2023 – arXiv:2310.08386. Monthly Notices RAS V.526 P.5648.

Кроликowski и др. (Krolikowski D.M., Kraus A.L., Tofflemire B.M., Morley C.V., Mann A.W., Vanderburg A.), 2023 – arXiv:2311.04971.

Ксю и др. (Xu F., Gu S., Ioannidis P.), 2022 – arXiv:2206.11814.

Кузнецов и др. (Kuznetsov A.A., Karakotov R.R., Chandrashekhar K., Banerjee D.), 2022 – arXiv:2211.03454.

Кумар и Фарес (Kumar M. and Fares R.), 2022 – arXiv:2209.11258. Monthly Notices RAS V.518 P.3147.

Кумбхакар и др. (Kumbhakar R., Mondal S., Ghosh S., Ram D., Pramanik S.), 2023 – arXiv:2309.01084.

Лайтцингер и др. (Leitzinger M., Odert P., Heinzl P.), 2022 - arXiv: 2205.03110. Monthly Notices RAS V.513 L.6058.

Ланцафаме и др. (Lanzafame A. C., Brugaletta E., Fremat Y., Sordo R., Creevey O.L.), 2022 – arXiv: 2206.05766. Astron.Astrophys. V.674 L.30.

Леманн и др. (Lehmann L.T., Donati J.-F., Fouque P., Moutou C., Bellotti S., Delfosse X., Petit P. et al.), 2023 – arXiv.231105039.

Лин и др. (Lin H.-T., Chen W.-P., Liu J., Zhang X., Zhang Y., Wang A., Wang S.-Y., Lehner M.J. et al.), 2022 – arXiv:2202.03006. Astron.J., V. 163, Is. 4, id.164, 12 pp

Лиу и др. (Liu Q., Lin J., Wang X., Gu S., Shi J., Zhang L., Xi G., Mo J. et al.), 2023 – arXiv:2302.00197. Monthly Notices RAS, V. 523, Is. 2, pp.2193-2208.

Лойд и др. (Loyd R.O.P., Schneider P.C., Jackman J.A.G., France K., Shkolnik E.L., Arulanantham N. et al.), 2023 - arXiv:2302.10259. Astron. J., V. 165, Is. 4, id.146, 13 pp.

Лу и др. (Lu Y., Curtis J.L., Angus R., David T.J., Hattori S.), 2022 – arXiv:2210.06604. Astron. J., V. 164, Is. 6, id.251, 15 pp.

Лун и др. (Luhn J. K., Write J.T., Henry G.W., Saar S.H., Baum A.C.), 2022 – arXiv:2207.00612. Astrophys.J.Let., V. 936, Is. 2, id.L23, 6 pp.

Маас и др (Maas A.J., Ilin E., Oshagh M., Palle E., Parviainen H., Molaverdikhani K. et al.), 2022 – arXiv.2210.11103.

Магаудда и др. (Magaudda E., Stelzer B., Raetz S., Klutsch), 2021 – arXiv:2106.14548. Astron. Astrophys., V. 661, id.A29, 23 pp.

МакГрегор и др. (MacGregor M.A., Weinberger A.J., Loyd R.O.P., Shkolnik E., Barclay T., Howard W.S., Zic A., Osten R.A., et al.), 2021 – Astrophys.J. V.911 L.25.

Марвин и др. (Marvin C.J., Reiners A., Anglada-Escude G., Jeffers S.V., Saikia S.B.), 2023 – arXiv:2302.00056.

Мартин и др. (Martin D.V., Sethi R., Armitage T., Gilbert G.J., Rodriguez-Martinez R., Gilbert E.A.) , 2023 – arXiv: 2301.10858. Monthly Notices RAS

Медина и др. (Medina A.A., Winters J.G., Irwin J.M.,Charbonneau D.), 2022 – arXiv:2205.02331. Astrophys.J., V. 935, Is. 2, id.104, 16 pp.

Меткалф и др. (Metcalf T.S., Finley A.J., Kochukhov O., See V., Ayres T.R., Stassun K.G., van Saders J.L. et al.), 2022 – arXiv:2206.08540. Astrophys. J. Let., V. 933, Is. 1, id.L17, 6 pp.

Меткалф и др. (Metcalf T.S., Strassmeier K.G., Ilyin I.V., Buzasi D., Kochukhov O., Ayres T.R., Basu S. et al.), 2024 – arXiv:2401.01944. Astrophys. J. Let., V. 960, Is. 1, id.L6, 6 pp.

Меткалф и др. (Metcalf T.S., Strassmeier K.G., Ilyin I.V., van Saders J.L., Ayres T.R., Finley A.J., Kochukhov O. et al.), 2023 – arXiv:2304.09896. Astrophys. J. Let., V. 948, Is. 1, id.L6, 5 pp.

Миттаг и др. (Mittag M., Schmitt J.H.M.M., Schroeder K.-P.), 2023 – arXiv:2306.05866. Astron. Astrophys., V. 674, id.A116, 17 pp.

Монсон и др. (Monson A.J., Mathioudakis M., Kowalski A.F.), 2024 – arXiv:2401.02261.

Монш и др. (Monsch K., Drake J.J., Garraffo C., Picogna G., Ercolano B.), 2023 – arXiv:2311.05673. Astrophys.J., V. 959, Is. 2, id.140, 16 pp.

Мюньер и др. (Meunier N., Kretzschmar M., Gravet R., Mignon L., Delfoss X.) – arXiv:2201.05492. Astron. Astrophys., V. 658, id.A57, 36 pp.

Намеката и др. (Namekata K., Airapetian V.S., Petit P., Maehara X., Ikuta K., Inoue S., Notsu Y. et al.), 2023 – arXiv:2311.07380.

Намеката и др. (Namekata K., Maehara H., Honda S., Notsu Y., Okamoto S., Takahashi J., Takayama M. et al.), 2022 – arXiv:2201.09416. Astrophys. J. Let., V. 926, Is. 1, id.L5, 8 pp.

Намизаки и др (Namizaki K., Namekata K., Maehara H., Notsu Y., Nogami D., Shibata K.), 2023 – arXiv:2302.03007. *Astrophys. J.*, V. 945, Is. 1, id.61, 9 pp.

Ноцу и др. (Notsu Y., Kowalski A.F., Maehara H., Namekata K., Hamaguchi K., Enoto T., Tristan I.I. et al.), 2023 – arXiv:2310.02450.

Ноцу и др. (Notsu Y., Maehara H., Honda S., Hawley S.L., Davenport J.R.A., Namekata K., Notsu S. et al.), 2019 – arXiv:1904.00142. *Astrophys. J.*, V. 876, Is. 1, article id. 58, 39 pp.

Нуньес и др. (Nunez A., Agueros M.A., Covey K.R., Douglas S.T., Drake J.J., Rampalli R. et al.), 2022 – arXiv:2205.06461. *Astrophys. J.*, V. 931, Is. 1, id.45, 29 pp.

Нуньес и др. (Nunez A., Agueros M.A., Curtis J.L., Covey K.R., Douglas S.T., Chu S.R.), 2023 – arxiv:2311.18690.

Окамото и др. (Okamoto S., Notsu Y., Maehara H., Namekata K., Honda S., Ikuta K., Nogami D., Shibata K.), 2020 – arXiv: 2011.02117.

Окс Е. (Oks E.), 2006 – Stark Broadening of Hydrogen and Hydrogenlike Spectral Lines in Plasmas. *The Physical Insight* (Oxford Alpha Science International)

Окс Е.А., 1981- Труды международной конференции «Год солнечного максимума». Т.1 С.200.

Окс и Гершберг (Oks E.A. and Gershberg R.E.), 2016 – *Astrophys. J.* V.816 №1 P.16.

Паудел и др. (Paudel R.R., Barclay T., Schlieder J.E., Quintana E.V., Gilbert E.A., Vega L.D., Youngblood A. et al.), 2021 – arXiv:2108.04753. *Astrophys. J.*, V. 922, Is. 1, id.31, 20 pp.

Певцов и др. (Pevtsov A.A., Fisher G.H., Aston L.W., Longcope D.W., Johns-Krull C.M., Kankelborg C.C. et al.), 2003 – *Astrophys. J.* V.598 P.1387.

Пиллитерри и др. (Pillitteri I., Micela G., Maggio A., Sciortino S., Lopez-Santiago J.), 2022 – arXiv:2201.12149. *Astron. Astrophys.*, V. 660, id.A75, 13 pp.

Пиллитерри и др. (Pillitteri I., Colombo S., Micela G., Wolk S.J.), 2023 – arXiv:2304.00854. *Astron. Astrophys.*, V. 673, id.A61, 6 pp.

Пиллитерри и др. (Pillitteri I., Micela G., Maggio A., Scortino S., Lopez-Santiago J.), 2022 – arXiv: 2201.12149. *Astron. Astrophys.*, V. 660, id.A75, 13 pp.

Пинеда и Вилладсен (Pineda J.S. and Villadsen J.), - 2023 – arXiv:2304.00031. *Nature Astronomy*, V. 7, p. 569-578

Пипин В.В., 2023 – arXiv:2311.09537.

Питрас и др. (Pietras M., Falewicz R., Siarkowski M., Bicz K., Pres P.), 2022 – arXiv: 2207.11039. *Astrophys.J.*, V. 935, Is. 2, id.143, 19 pp.

Попинчак и др.(Popinchak M., Faherty J.K., Kiman R., Gagne J., Curtis J.L., Angus R., Cruz K.L. et al.), 2021 – arXiv:2105.05935.

Райнерс и др. (Reiners A., Shulyak D., Kapyla (двоеточие над обоими а) P.J., Ribas I., Nagel E., Zechmeister M., Caballero J.A. et al.), 2022 – arXiv:2204.00342. *Astron.Astrophys.*, V.662, id.A41, 13 pp.

Райнхольд и др. (Reinhold T., Shapiro A.I., Solanki S.K., Basri G.), 2022 - arXiv:2209.12593. *Astrophys.J. Let.*, V. 938, Is. 1, id.L1, 7 pp.

- Рамсэй и др. (Ramsay G., Kolotkov D., Doyle J.G., Doyle L.), 2021 – arXiv: 2108.1067. Solar Physics, V. 296, Is. 11, article id.162
- Ригни и др. (Rigney J., Ramsay G., Carley E.P., Doyle J.G., Gallagher P.T., Wang Y., Pritchard J. et al.), 2022 – arXiv:2207.00405. Monthly Notices RAS, V. 516, Is. 1, pp.540-549
- Рип и Айрапетян (Reep J.W and Airapetian V.S.), 2023 – Astrophys.J. V. 958:9 (18pp).
- Родригес и др. (Rodriguez L.F., Lizano S., Canto J., Gonzalez R.), 2023 – arXiv:2309.03862. Astron. Astrophys., V. 678, id.A185, 6 pp.
- Сайрам и др. (Sairam L., Pathak U., Singh K.P.), 2023 – arXiv:2309.11286. Journal of Astrophysics and Astronomy, V. 44, Is. 2, article id.90
- Сакауе и Шибата (Sakaue T. And Shibata K.), 2020 – arXiv:2012.10868. Astrophys. J. Let., V. 906, Issue 2, id.L13, 7 pp.
- Селигман и др. (Seligman D.Z., Rogers L.A., Feinstein A.D., Krumholz M.R., Beattie J.R., Federrath C., Adams F.C. et al.), 2022 – arXiv:2201.03697. Astrophys.J., V. 929, Is. 1, id.54, 14 pp.
- Сенавки и др. (Senavci H.V., Kilicoglu T. Isik E., Hussaion G.A.J., Montes D., Bahar E., Solaki S.K.), 2021 – arXiv: 07248v1 18 Jan 2021.
- Си и др. (See V., Roquette J., Amard L., Matt S.), 2023 – arXiv:2307.01688.
- Симойнс и др. (Simoes P.J.A., Araujo A., Valio A., Fletcher L.), 2024 – arXiv:2401.07824.
- Соарес и др. (Soares M.C.R., de Freitas M.C., Ferreira B.P.R.), 2022 – arXiv:2209.15119.
- Сондерс и др. (Saunders N., van Sadlers J.L., Lyttle A.J., Metcalfe T.S., Li T.Z., Davies G.R, Hall O.J. et al.) 2023 – arXiv:2309.05666.
- Суреш и др. (Suresh A., Chatterjee S., Cordes J.M., Bastian T.S., Halliman G.), 2020 – arXiv:2010.05929. Astrophys. J., V. 904, Issue 2, id.138, 7 pp.
- Ториуми и Айрапетян (Toriumi S. and Airapetian V.S.), 2022 – arXiv: 2202.01232. Astrophys. J., V. 927, Is. 2, id.179, 16 pp.
- Ториуми и др. (Toriumi S., Airapetian V.S., Namekata K., Notsu Y.), 2022 – arXiv:2208.10511. Astrophys. J. Suppl. Ser., V. 262, Is. 2, id.46, 20 pp.
- Тристан и др. (Tristan I.I., Notsu Y., Kowalski A.F., Brown A., Wisniewski J.P., Osten R.A., Vrijmoet E.H., White G.L. et al.), 2023 – arXiv:2304.05692. Astrophys. J. V.951 P.33.
- Ту и др. (Tu Z.-L., Yang M., Wang H.-F., Wang F.Y., 2021 – arXiv: 2101.02901
- Файнштейн и др. (Feinstein A.D., France K., Youngblood A., Duvvuri G.M., Teal DJ., Cauley P.W., Seligman D.Z. et al.), 2022 – arXiv:2205.09606. Astron. J., V.164, Is. 3, id.110, 22 pp.
- Файнштейн и др. (Fienstein A.D., Seligman D.Z., Guenther M.N., Adams F.C.), 2021 – arXiv:2109.07011.
- Флэгг и др. (Flagg L., Johns-Krull C., France K., Herczeg G., Najita J., Youngblood A., Carvalho A. et al.), 2022 – arXiv:2206.02636.

Фурмайстер и др. (Fuhrmeister B., Coffaro M., Stelzer B., Czesla P.C., Mittag M., Schneider P.C.), 2023 – arXiv:230308487.

Фурмайстер и др. (Fuhrmeister B., Czesla S., Robrade J., Gonzalez-Perez J.N., Schneider C., Mittag M., Schmitt J.H.M.M.), 2021 – arXiv:2106.14546. *Astron. Astrophys.*, V. 661, id.A24, 11 pp.

Фурмайстер и др. (Fuhrmeister B., Zisik A., Schneider P.C., Robrade J., Schmitt J.H.M.M., Predehl P., Czesla S. et al.), 2022 – arXiv:2204.09270. *Astron. Astrophys.*, V.663, id.A119, 11 pp. *Astronomy*

Халин и др. (Hahlin A., Kochukhov O., Rains A.D., Lavail A., Hatzes A., Piskunov N., Reiners A., Seemann U. et al.), 2023 – arXiv:2305.06873. *Astron. Astrophys.*, V. 675, id.A91, 29 pp.

Хамагучи и др. (Hamaguchi K., Reep J.W., Airapetian V., Toriumi S., Gendreau K.c., Arzoumanian Z.), 2023 – arXiv:2301.01377 *Astrophys.J.*, V. 944, Is. 2, id.163, 15 pp.

Цветкова и др. (Tsvetkova S., Morin J., Folsom C.P., Le Bouquin J.-P., Alecian E., Bellotti S., Hussain G. et al.), 2023 – arXiv:2312.04247. arXiv:2312.04247

Чахал и др. (Chahal D., de Grijs R., Kamath D., Chen X.), 2022 – arXiv:2206.05505. *Monthly Notices RAS*, V.514, Is. 4, pp.4932-4943

Чебли и др. (Chebly J., Alvarado-Gomez J.D., penhaeger Poppenhäger K., Garraffo C.), 2023 – arXiv:2307.04615. *Monthly Notices RAS* V..524 P..5060.

Чен и др. (Chen H., Tian H., Li H., Wang J., Lu H., Xu Y. et al.), 2022 – arXiv:2205.14293. *Astrophys. J.*, V. 933, Is. 1, id.92, 13 pp.

Шан и др. (Shan Y., Revilla D., Skrzypinski S.L., Dreizier S., Bejar V.J.S., Caballero J.A., Cardona C. et al.), 2024 – arXiv:2401.09550.

Шляпников (Shlyapnikov A.A.), 2024 - *Catalog of Stars with Solar-Type Activity — CSSTA-3 // Physics of mid- and low-mass stars with solar-type activity and their impact on exoplanetary environments / R.E. Gershberg, N.I. Kleorin, L.A. Pustilnik, V.S. Airapetian, A.A. Shlyapnikov/ Симферополь, ООО "Форма", С. 750-763.*

ШМИТТ и др. (Schmitt J.H.M.M., Ioannidis P., Robrade J., Predehl P., Czesla S., Schneider P.C.), 2021 – arXiv: 2106.14537. *Astron. Astrophys.*, V. 652, id.A135, 9 pp.

Штельцер и др. (Stelzer B., Bogner M., Magaundda E., Raetz S.), 2022 – arXiv:2207.03794. *Astron. Astrophys.* V. 665, id.A30, 23 pp.

Штельцер и др. (StelzerB., Caramazza M., Raetz St., Argiroffi C., Coffaro M.), 2022 – arXiv:2209.05068. *Astron Astrophys.*, V. 667, id.L9, 9 pp.

Эвенсбергет (Evensberget D., Carter B.D., Marsden S.C., Brookshaw L., Folsom C.P.), 2021, *Monthly Notices RAS.*, V. 506, Is. 2, P. 2309.

Эвенсбергет и др. (Evensberget D., Marsden S.C., Carter B.D., Salmeron R., Vidotto A.A., Folsom C.P., Kavanagh R.D. et al.), 2023 – arXiv:205.17427.

ЭНГЛ (Engle S.G.), 2023 – arXiv:2310.04302. *Astrophys. J.*, V. 960, Is. 1, id.62, 17 pp.

Ямашита и др. (Yamashita M., Itoh Y., Oasa Y.), 2022 – PASoc Japan, V. 74, Is. 6, P. 1295.

Янг и др. (Yang K. E., Sun X., Kerr G.S., Hudson H.S.), 2023 – arXiv:2310.19316. Astrophysical Journal, Volume 959, Issue 1, id.54, 19 pp.

Составление этого обзора было бы невозможно без регулярно присылаемых М.М.Кацовой публикаций arXiva, и я ей за это глубоко благодарен. Я благодарю А.А.Шляпникова, Я.В.Поклад и М.А.Смирнову за помощь в этой работе.

Январь 2024 года