

О СВОЙСТВАХ КОРОНАЛЬНЫХ ВЫБРОСОВ МАССЫ У ЗВЕЗД ПОЗДНИХ СПЕКТРАЛЬНЫХ КЛАССОВ

© 2020 г. И. С. Саванов^{1*}

¹Институт астрономии РАН, Москва, Россия

Поступила в редакцию 11.09.2020 г.

После доработки 27.10.2020 г.; принята к публикации 27.10.2020 г.

Методика оценок корональных выбросов массы (СМЕ) по энергии вспышек звезд применена к данным о вспышечной активности звезд поздних спектральных классов. В исследовании использованы данные каталогов о вспышках звезд, полученные по результатам наблюдений телескопа Кеплер, и представлены зависимости величин масс СМЕ от эффективной температуры объектов из этих каталогов. Установлено, что в этом случае диапазон изменений масс СМЕ составляет примерно 10^{19} – 10^{22} г, при этом по мере перехода к более горячим (более массивным) звездам наблюдается рост массы СМЕ. Рассмотрены данные для нескольких активных хорошо изученных звезд, которые характеризуют возможный диапазон изменений свойств СМЕ для холодных карликов. Полученные результаты сопоставлены с данными, найденными независимым методом оценок характеристик СМЕ по спектральным наблюдениям. Оценки масс СМЕ, установленные по эмпирическим зависимостям для энергий вспышек, превосходят по величине данные о массах СМЕ, найденные по асимметрии профилей Бальмеровских линий водорода.

Ключевые слова: звезды, активность.

DOI: 10.31857/S0320010820120049

ВВЕДЕНИЕ

Активность Солнца, связанная с корональными выбросами массы (СМЕ), является важным фактором, влияющим на магнитосферы, атмосферы и поверхности планет Солнечной системы. Следуя идее солнечно-звездной аналогии, явления СМЕ можно ожидать и на других звездах. Основными факторами воздействия звездных СМЕ на экзопланеты являются ударные волны, сопутствующие им возмущения плотности, скорости и магнитного поля звездного ветра, ускорение и удержание энергичных заряженных частиц. Все эти факторы должны быть должным образом учтены при изучении эволюционных процессов на экзопланетах и их атмосферных и плазменных средах. Планетарное влияние звездной активности СМЕ может варьироваться в зависимости от возраста звезды, ее спектрального типа и орбитального расстояния планеты (см. обсуждение большинства вопросов, например, в Шривер и др., 2019).

Солнечные СМЕ являются наиболее изученными и с наблюдательной, и с теоретической точек зрения (см. обзор Килпуа и др., 2017). Их основные характеристики таковы: частота СМЕ — от

0.5 до 6 СМЕ в сутки, характерные скорости — 250–500 км/с (вплоть до тысячи км/с), масса — 10^{14} – 10^{16} г. Указанные величины изменяются в зависимости от фазы активности солнечного цикла. Изучения звездных СМЕ (их масс, скоростей, частот появления) более затруднены, они могут быть основаны на анализе спектральных наблюдений звезд, их вспышечной и пятенной активности, на исследованиях излучения объектов в рентгеновском, *FUV*, *UV* и радио-диапазонах.

Наблюдения, выполненные с космическим телескопом Кеплер и миссией TESS, открыли возможность изучения вспышечной активности и фотометрической переменности блеска, вызванной вращательной модуляцией запятненной поверхности, для десятков тысяч объектов. В каталоге вспышек звезд Гюнтер и др. (2020), основанном на первом релизе архива миссии TESS, сделаны оценки масс СМЕ.

Цель нашего исследования состоит в применении методик оценок масс СМЕ по энергии вспышек звезд по результатам наблюдений телескопа Кеплер и их сопоставлении с другими определениями.

*Электронный адрес: igs231@mail.ru

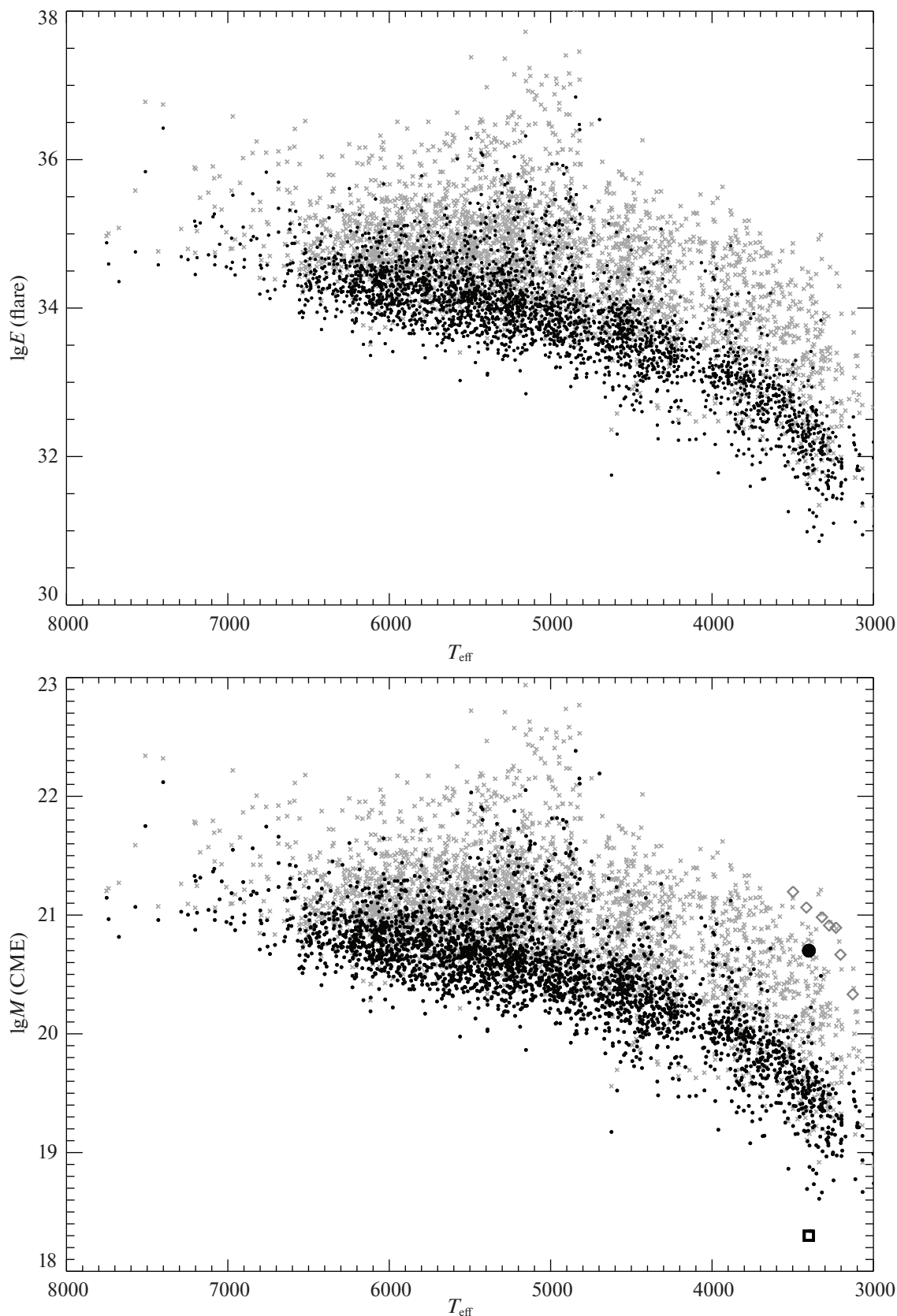


Рис. 1. (а) — Зависимость величин $\log E_{\text{flare}}$ от эффективной температуры для объектов из каталога Янг и др. (2019) (темные кружки для средней энергии вспышки и серые крестики для E_{max}). (б) — Зависимость величин $\log M_{\text{CME}}$ от эффективной температуры для объектов из каталога Янг и др. (2019) (темные кружки для средней энергии вспышки и серые крестики для E_{max}). Ромбы — данные Чанг и др. (2019) для восьми карликов спектрального класса М с супервспышками, крупный темный кружок — данные для YZ CMi, квадрат — для V347 Peg.

СМЕ И ВСПЫШЕЧНАЯ АКТИВНОСТЬ ЗВЕЗД

Для оценки свойств СМЕ может быть использована эмпирическая зависимость, связывающая энергию вспышки и массу СМЕ Аарнио и др. (2012). Эта зависимость была установлена по данным для Солнца, но затем калибрована с использованием набора хорошо изученных активных звезд на стадии эволюции до главной последовательности. Зависимость может быть применима к объектам с энергией вспышек до 10^{38} эрг, что соответствует массе СМЕ до 10^{22} г. Отметим, что зависимость из Аарнио и др. (2012) была установлена по измерениям энергии вспышек в рентгеновском диапазоне спектра, поэтому, аналогично Гюнтер и др. (2020), мы будем использовать скорректированное соотношение, в котором рассматривается болометрическая энергия вспышки (как и в Гюнтер и др., 2020, мы ввели при оценке масштабирующий множитель 100). Используемый метод имеет ограничения, прежде всего, вызванные принципиальным распространением солнечной аналогии на звезды других спектральных классов, а также неопределенностями, конкретно возникающими при применении скорректированного соотношения с масштабирующим множителем.

Применение зависимости к данным наблюдений 763 объектов по первым наблюдениям миссии TESS привело к выводу о том, что для них характерная величина массы СМЕ составляет 10^{19} г (медианное значение), диапазон изменений — от 10^{18} до 10^{32} г для наиболее массивного СМЕ. Отметим, что эта величина соответствует самой сильной из зарегистрированных вспышек для звезды — гиганта TIC 404768019 ($T_{\text{эф}} = 5358$ К).

В нашей работе мы использовали данные двух литературных источников. Во-первых, мы рассмотрели результаты исследования Янг и др. (2019), содержащего сведения о 162 262 вспышках для 3420 звезд. Каталог включает данные о вспышках у звезд спектральных классов от А (в дискуссионном плане) до М. На основе данных табл. 2 о 162 262 вспышках из Янг и др. (2019) для каждой звезды мы нашли средние E и максимальные E_{max} величины энергий вспышек. По методике, представленной в Гюнтер и др. (2020) и упомянутой выше, на основе данных о средних энергиях вспышек мы определили величины масс СМЕ для 3020 объектов из Янг и др. (2019). На рис. 1 представлена зависимость величин масс СМЕ от эффективной температуры объектов из этого каталога (темные кружки). Если в качестве исходных данных использовать не величины E , а E_{max} , то это приведет к увеличению оценки массы СМЕ примерно на порядок величины (серые крестики на рис. 1). Представленная зависимость

указывает на то, что диапазон изменений масс СМЕ, установленных на основе соотношения из Аарнио и др. (2012), составляет $10^{19} - 10^{22}$ г, при этом по мере перехода к более горячим (более массивным) звездам наблюдается рост массы СМЕ. Звезды солнечного типа, согласно оценке, основанной на использовании энергии вспышек, должны обладать СМЕ с массами от 3×10^{20} г до 10^{21} г, что существенно выше, чем наблюдается у Солнца. Возможно, это обусловлено эффектами наблюдательной селекции — наблюдения с телескопом Кеплер проводились для звезд с более высокой вспышечной и пятенной активностью.

Ван Доорсселаере и др. (2017), на основе данных наблюдений телескопа Кеплер, выполненных только в моде LC сета Q15, провели исследования вспышечной активности 6662 звезд, для которых в общей сложности было зарегистрировано 16 850 вспышек. На основе этих данных об энергиях вспышек мы определили массы СМЕ для всех вспышек всех объектов. На рис. 2 представлена зависимость величин $\log M(\text{СМЕ})$ от эффективной температуры объектов из каталога (светлые кружки). Каталог Ван Доорсселаере и др. (2017) содержит многочисленные измерения для объектов с $T_{\text{эф}}$ выше 8000 К (на рис. 2 они не показаны, обсуждение достоверности этих результатов см. в Ван Доорсселаере и др., 2017, и Янг и др., 2019), а также данные для звезд гигантов — они представлены кластером светлых точек в температурном диапазоне 4500–5000 К. Данные для звезд карликов приведены на рис. 2 темными символами. В диапазоне $T_{\text{эф}}$ от 3500 до 6000 К они образуют монотонно возрастающую последовательность, соответствующую массам СМЕ от 10^{20} до 10^{21} г. Амплитуда изменений величин $\log M_{\text{СМЕ}}$ для звезд солнечного типа составляет 19.5–21.3. Поскольку распределения энергии вспышек в зависимости от $T_{\text{эф}}$, представленные в каталогах Ван Доорсселаере и др. (2017) и Янг и др. (2019), различаются, то различия имеются и для величин $\log M_{\text{СМЕ}}$. Особо заметны расхождения для звезд с $T_{\text{эф}}$ ниже 4000 К. Однако в предположении о применимости калибровки из Аарнио и др. (2012) в целом можно заключить, что оба каталога указывают на характерный диапазон изменений масс СМЕ от $10^{19.5}$ до $10^{21.5}$ г.

СВОЙСТВА СМЕ ПО ВСПЫШКАМ ХОЛОДНЫХ КАРЛИКОВ

Для того чтобы оценить величины максимально возможных масс СМЕ для самых холодных карликов, мы использовали данные Чанг и др. (2018) об энергиях супервспышек восьми карликов спектрального класса М (символ ромб на рис. 1).

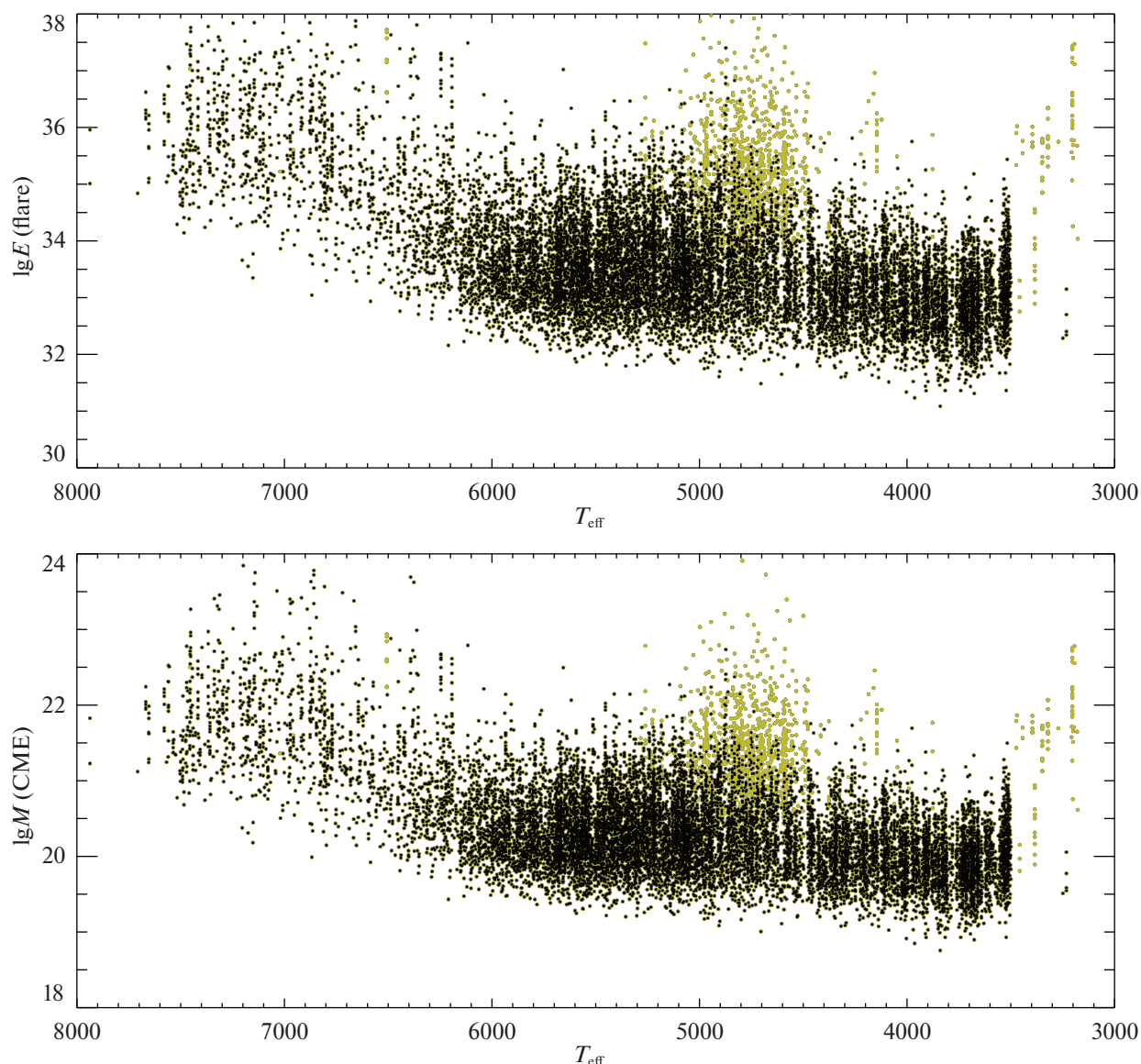


Рис. 2. (а) — Зависимость величин $\log E_{\text{flare}}$ от эффективной температуры для объектов из каталога Ван Доорсселаера и др. (2017) (светлые кружки). Данные для звезд карликов приведены темными символами. (б) — Зависимость величин $\log M_{\text{CME}}$ от эффективной температуры для объектов из каталога Ван Доорсселаера и др. (2017) (светлые кружки). Данные для звезд карликов приведены темными символами.

Энергии супервспышек этих объектов лежат в диапазоне величин $\log E$ от 33.59 до 34.96 эрг. Масса соответствующих СМЕ в этом случае может достигать величины 1.5×10^{21} г, что не только сопоставимо, но даже немного превосходит массы СМЕ звезд солнечного типа, установленные по средним энергиям вспышек.

Энергия мегавспышки на поверхности dM4.5e звезды YZ CMi (Ковальски и др., 2012) (рекордное увеличение излучения звезды в фильтре U на 6 звездных величин) могла бы соответствовать корональному выбросу с массой 5.4×10^{20} г.

Наконец, для ультра-быстровращающегося M4

карлика V374 Peg Вида и др. (2016) в ходе анализа данных многолетних фотометрических и спектральных наблюдений получили одновременные оценки переменности блеска, энергии вспышек и скорости движения СМЕ (675 км/с). Кроме того, принимая для звезды величину рентгеновской светимости $L_x = 2.5 \times 10^{28}$ эрг (Вида и др., 2016), можно получить оценку массы СМЕ, равную 2.9×10^{18} г. Исходя из анализа спектральных наблюдений профилей линии H α , Вида и др. (2016) установили, что масса СМЕ составляет 10^{16} г при средней частоте 1 событие в 10 ч.

Данные для звезд V374 Peg и YZ CMi харак-

теризуют возможный диапазон изменений свойств СМЕ для холодных карликов.

СВОЙСТВА СМЕ ПО СПЕКТРАЛЬНЫМ НАБЛЮДЕНИЯМ

Существует еще один независимый метод оценок характеристик СМЕ по спектральным наблюдениям. Он основан на изучении абсорбционных и эмиссионных деталей профилей Бальмеровских линий видимого и УФ спектральных диапазонов у звезд как солнечного типа, так и более холодных (см. серии публикаций, перечисленных в Вида и др., 2019, и Лейтзингер и др., 2020). Детальное обсуждение достигнутых результатов для карликов спектрального класса М приводится в Вида и др. (2019), а для звезд солнечного типа — в Лейтзингер и др. (2020). Исследования последних трех десятилетий, как правило, содержали результаты анализа одной или нескольких звезд и лишь нескольких событий (обзор литературы можно найти у Лейтзингер и др., 2020). Одно из первых обширных исследований было выполнено в работе Фюрмейстер и др. (2018), его авторы рассмотрели 473 спектра, полученные для 28 М-карликов. Вида и др. (2019) изучили 5500 спектров М-карликов и установили, что для 25 звезд имеются асимметрии профилей Бальмеровских линий водорода. Для этих объектов частота появления зарегистрированных событий находится в пределах от 1.2 до 19.6 событий в сутки. Измеренные по доплеровскому смещению скорости СМЕ соответствуют величинам 100–300 км/с. Получено, что массы СМЕ составляют 10^{15} – 10^{18} г. Имеются указания, что события являются более частыми у более холодных звезд с более высокой хромосферной активностью. Ценность метода определений характеристик СМЕ по спектральным наблюдениям состоит в том, что он дает возможность найти как кинематические характеристики, так и оценку частоты появления событий.

Лейтзингер и др. (2020) из анализа спектров видимого диапазона 425 FGK карликов, полученных в ходе 3700 ч наблюдательных программ, зарегистрировали лишь несколько вспышек и сделали вывод о малом числе проявлений СМЕ. Авторы пришли к заключению, что столь низкий уровень обнаруженной активности исследованных объектов обусловлен двумя причинами — не только самой низкой активностью, но и наблюдательными ограничениями, вызванными недостаточностью продолжительности наблюдений. Лейтзингер и др. (2020) также обсуждают возможность того, что области излучения в линии $H\alpha$ были слишком малы для регистрации в проведенных наблюдениях. При достигнутых в наблюдениях отношениях

S/N, по оценке Лейтзингер и др. (2020), могли бы быть обнаружены СМЕ солнечного типа с массой 10^{16} – 10^{17} г и выше. Исследование Лейтзингер и др. (2020) было основано на использовании архивных данных, для обнаружения СМЕ меньших масс нужны специализированные наблюдения достаточной продолжительности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Параметры СМЕ для звезд поздних спектральных классов (масса, скорости, частота и др.) остаются все еще мало изученными. Можно заключить, что в настоящее время выполненные по различным методикам оценки масс СМЕ заметно различаются между собой, а сведения о свойствах СМЕ звезд поздних спектральных классов недостаточны. Наиболее полные данные о СМЕ, вероятно, могут быть получены для холодных М карликов при спектральных исследованиях. Самые многочисленные оценки свойств корональных выбросов найдены в настоящее время при использовании наблюдательных данных космических миссий Кеплер, TESS и эмпирической зависимости, связывающей энергию вспышки и массу СМЕ.

В нашем исследовании использованы данные двух каталогов о вспышках звезд, полученные по результатам наблюдений телескопа Кеплер, и представлены зависимости величин СМЕ от эффективной температуры объектов из этих каталогов. Найдено, что в этом случае диапазон изменений масс СМЕ составляет примерно 10^{19} – 10^{22} г, при этом по мере перехода к более горячим (более массивным) звездам наблюдается рост массы СМЕ.

Оценки масс СМЕ, найденные по эмпирическим зависимостям для энергий вспышек, превосходят по величине данные о массах СМЕ, найденные по асимметрии профилей Бальмеровских линий водорода. Согласно Вида и др. (2016), данные для одного и того же объекта могут различаться между собой. Исследование Вида и др. (2016) дает пример того, как для одного объекта при изучении вспышечной активности, профилей Бальмеровских линий водорода можно получить оценки масс СМЕ различными способами и сопоставить между собой. Исследования такого характера, распространенные на другие звезды спектральных классов G–M, крайне необходимы в будущем. Развитые методы найдут широкое применение при оценке параметров СМЕ звезд с экзопланетами и позволят изучить эволюцию атмосфер экзопланет при воздействии внешних факторов.

Автор признателен правительству Российской Федерации и Министерству высшего образования и науки РФ за поддержку по гранту 075-15-2020-780 (№ 13.1902.21.0039).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аарнио и др. (A.N. Aarnio, S.P. Matt, and K.G. Stassun), *Astrophys. J.* **760**, 9 (2012).
2. Ван Доорсселаере и др. (T. Van Doorsselaere, H. Shariati, and J. Debosscher), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **232**, 26 (2017).
3. Вида и др. (K. Vida, L. Kriskovics, K. Oláh, M. Leitzinger, P. Odert, Zs. Kovári, H. Korhonen, R. Greimel, et al.), *Astron. Astrophys.* **590**, A11 (2016).
4. Вида и др. (K. Vida, M. Leitzinger, L. Kriskovics, B. Seli, P. Odert, O.E. Kovacs, H. Korhonen, and L. van Driel-Gesztelyi), *Astron. Astrophys.* **623**, A49 (2019).
5. Пюнтер и др. (M.N. Günther, Z. Zhan, S. Seager, P.B. Rimmer, S. Ranjan, K.G. Stassun, R.J. Oelkers, T. Daylan, et al.), *Astron. J.* **159**, 60 (2020).
6. Килпуа и др. (E. Kilpua, H.E.J. Koskinen, and T.I. Pulkkinen), *Liv. Rev. Solar Phys.* **14**, 5 (2017).
7. Ковальски и др. (A.F. Kowalski, S.L. Hawley, J.A. Holtzman, J.P. Wisniewski, and E.J. Hilton), *Solar Phys.* **277**, 21 (2012).
8. Лейтзингер и др. (M. Leitzinger, P. Odert, R. Greimel, K. Vida, L. Kriskovics, E.W. Guenther, H. Korhonen, F. Koller, et al.), *MNRAS* **493**, 4570 (2000).
9. Фюрмейстер и др. (B. Fuhrmeister, S. Czesla, J.H.M.M. Schmitt, S.V. Jeffers, J.A. Caballero, M. Zechmeister, A. Reiners, I. Ribas, et al.), *Astron. Astrophys.* **615**, A14 (2018).
10. Шриввер и др. (K. Schrijver, F. Bagenal, T. Bastian, J. Beer, M. Bisi, T. Bogdan, S. Bougher, D. Boteler, et al.), arXiv:1910.14022 (2019).
11. Чанг и др. (H.-Y. Chang, C.-L. Lin, W.-H. Ip, L.-C. Huang, W.-C. Hou, P.-C. Yu, Y.-H. Song, and A. Luo), *Astrophys. J.* **867**, 78 (2018).
12. Янг и др. (H. Yang and J. Liu), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **241**, 29 (2019).