

УДК 524.316.2-56; 524.338.6-56

ПАРАМЕТРЫ СУПЕРВСПЫШЕК ЗВЕЗД СПЕКТРАЛЬНОГО КЛАССА G ПО НАБЛЮДЕНИЯМ С КОСМИЧЕСКИМ ТЕЛЕСКОПОМ KEPLER

© 2016 И. С. Саванов^{1*}, Е. С. Дмитриенко²

¹Институт астрономии РАН, Москва, 119017 Россия

²Государственный астрономический институт им. П. К. Штернберга Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, Москва, 119991 Россия

Поступила в редакцию 9 апреля 2015 года; принята в печать 30 октября 2015 года

Продолжен анализ данных для 279 звезд спектрального класса G с супервспышками с энергиями в диапазоне 10^{33} – 10^{36} эрг. Вычислен параметр SFL (доля поверхности звезды, излучающей в ходе вспышки). Оценки SFL получены из соотношения, связывающего эту величину с амплитудой вспышки и ее излучением в предположении о его чернотельном характере в моменты, близкие к максимуму вспышки. Большинство величин SFL находятся в интервале 0–0.1, достигая для отдельных сильных вспышек величин 0.2–0.4. Зависимость SFL от эффективной температуры для звезд с супервспышками повторяет по характеру установленную нами ранее зависимость для запятненности S . Распределение SFL достигает своего максимума в области температур 5100–5250 K и спадает при росте эффективной температуры. Высказано предположение о присутствии на диаграмме «SFL–период вращения» бимодального распределения с провалом для объектов с периодом вращения P около десяти суток. Для группы звезд с P менее десяти суток приведенные данные могут указывать на уменьшение площадей вспышек при увеличении величины P . Наш анализ показал, что у одной и той же звезды при малых изменениях площадей холодных пятен S могут достигаться значительные изменения как энергии вспышек, так и размеров площади поверхности, на которой происходят вспышки.

Ключевые слова: звёзды: активность — звёзды: вспыхивающие — звёздные пятна

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящем исследовании нами продолжен анализ свойств активных областей 279 звезд спектрального класса G, у которых было открыто более полутора тысяч супервспышек с энергиями в диапазоне 10^{33} – 10^{36} эрг.

Основываясь на наблюдательных данных из [1], мы ранее установили [2], что для звезд с супервспышками характерна повышенная запятненность поверхности, что следует рассматривать как свидетельство их повышенной магнитной активности. Независимое определение блеска этих звезд [3] позволило нам подтвердить это заключение. Анализируя эти же данные [3], мы пришли к выводу о том, что, несмотря на повышенную запятненность, звезды с супервспышками не выделяются из общего массива звезд параметрами дифференциального вращения $\Delta\Omega$.

В работе [4] мы рассмотрели диаграммы, связывающие энергии супервспышек с параметрами

активности звезд (площадью их магнитных пятен), а также выполнили более обширное исследование активности двух звезд с рекордным числом вспышек. В результате было показано, что диапазон изменений энергий супервспышек звезд (вплоть до двух порядков) реализуется для всего интервала значений периодов их вращения. Высказано предположение о присутствии бимодального распределения данных на диаграмме «энергия супервспышек–период вращения звезды.» На диаграмме «энергия супервспышек–площадь холодных пятен» были выделены три группы звезд, различающихся по величине запятненности поверхности. Было подтверждено предположение о том, что вспышечная активность не связана непосредственно с приполюсными активными областями. Анализ звезд из выборки, включающей объекты с более чем 20 супервспышками, показал, что для одной и той же звезды при малых изменениях запятненности S могут достигаться значительные изменения энергии (вплоть до двух порядков). Для двух объектов из всей выборки (KIC 10422252 и

*E-mail: issesd@rambler.ru

KIC 11764567) была зарегистрирована существенная переменность запятненности (в 5–6 раз). Увеличение энергии вспышек на порядки наблюдалось для этих объектов при любом уровне запятненности. Наконец, для двух звезд, KIC 11551430 и KIC 11764567, по всем доступным фотометрическим измерениям из архива данных телескопа Kepler был выполнен детальный анализ активности. Ранее для KIC 11551430 было зафиксировано рекордное число вспышек (в среднем одна вспышка за семь суток); KIC 11764567 имеет наибольшее число вспышек (в среднем одна вспышка за 25 суток) среди звезд с периодами вращения, сопоставимыми с солнечным. По построенным картам поверхностных температурных неоднородностей изучаемых звезд были определены долготы и другие характеристики активных областей.

Наши вычисления величин запятненности S предоставили возможность провести ряд дополнительных сопоставлений параметров звезд, обладающих супервспышками, [4]. Кроме того, данные из статьи [1] позволяют также выполнить оценки величин SFL (относительная площадь поверхности звезды, с которой наблюдается излучение в ходе вспышки). В литературе можно найти оценки этих величин для вспыхивающих звезд (см. [5, 6] и ссылки в них). В [6] также указываются возможные причины, по которым эти оценки представляют интерес, прежде всего, для сравнения вспышек между собой, установления механизма нагрева и прочее.

2. ХАРАКТЕРИСТИКИ СУПЕРВСПЫШЕК ЗВЕЗД СОЛНЕЧНОГО ТИПА

При детальном исследовании вспыхивающих звезд возможно проведение анализа одновременных спектральных и фотометрических (широкополосных и в «белом свете») наблюдений [6]. Методики, развитые в таких исследованиях, позволяют учитывать многочисленные дополнительные факторы (см. [6]), недоступные нам, поэтому при анализе наблюдательных данных, полученных с телескопом Kepler (отсутствие многоцветной фотометрии), мы будем вынуждены ограничиться самыми простыми оценками. Отметим, что подобные оценки ранее применялись на начальных этапах изучения вспыхивающих звезд (см. [5, 7]).

Величина площади вспышки SFL, выраженная в долях видимой поверхности звезды, может быть получена из простого соотношения, связывающего эту величину с амплитудой вспышки и ее излучением (в предположении о чернотельном характере излучения вспышки в моменты, близкие к ее максимуму):

$$\text{SFL} = (k - 1) \frac{F_{\text{star}}}{F_{T_{\text{BB}}}},$$

где k — нормированная амплитуда вспышки.

Согласно [5–7], излучение во время максимума вспышки носит чернотельный характер и характеризуется температурой T_{BB} . Для вспыхивающих звезд T_{BB} определяется по цветовым диаграммам. Поскольку при анализе наблюдательных данных, полученных с телескопом Kepler, мы лишены этой возможности, величина T_{BB} может варьироваться в качестве параметра. При изучении вспыхивающих звезд (см. [7]) поток от невозмущенной фотосферы объекта F_{star} также может быть оценен в чернотельном приближении. Однако для рассматриваемых звезд мы использовали оценки потоков, вычисленные с моделями Куруца по приведенным в [1] оценкам эффективной температуры. Очевидно, что рассчитанные распределения энергии требуют сверки с учетом эффективного пропускания всей аппаратуры (в нашем случае для миссии Kepler это телескоп и детектор со спектральной полосой от 400 до 850 нм). Похожее соотношение для оценки величины площади вспышки по наблюдениям звезды EV Lac в фильтре U приводится, например, в [7], где при температуре $T_{\text{BB}} = 18\,500$ К и эффективной температуре звезды EV Lac 3300 К получена оценка площади вспышки в 1.1 % от видимой поверхности звезды. Кроме того, соотношение, близкое к нашему, рассматривалось в [1], причем для температуры T_{BB} принималась величина 10 000 К, и была определена энергия супервспышек.

По приведенному соотношению в предположении о температуре $T_{\text{BB}} = 20\,000$ К по данным из [1] о 1547 вспышках мы определили величины SFL для 279 звезд солнечного типа с супервспышками. По нашей оценке большинство величин SFL находится в интервале 0–0.1, достигая для отдельных сильных вспышек величин 0.2–0.4. На рис. 1а и 1б приведены зависимости величин площадей вспышек SFL и, для сравнения, площадей холодных пятен S на поверхности изученных звезд от их эффективной температуры T_{eff} .

Распределение параметра запятненности от T_{eff} было проанализировано нами ранее в [2] и привело к выводу о повышенной запятненности поверхности звезд, обладающих супервспышками (их повышенной магнитной активности). Распределение S (рис. 1б) достигает своего максимума в области температур 5100–5250 К и спадает при увеличении эффективной температуры. Выделяющийся объект с S выше 0.3 — это звезда KIC 7174505 [1], ее свойства будут рассмотрены в отдельном исследовании (после детального анализа по методикам, представленным, например, в [8–11]). Вид распределения SFL (рис. 1а) по T_{eff} по своему характеру подобен установленному распределению для S . Отношения параметров SFL и S приводятся на

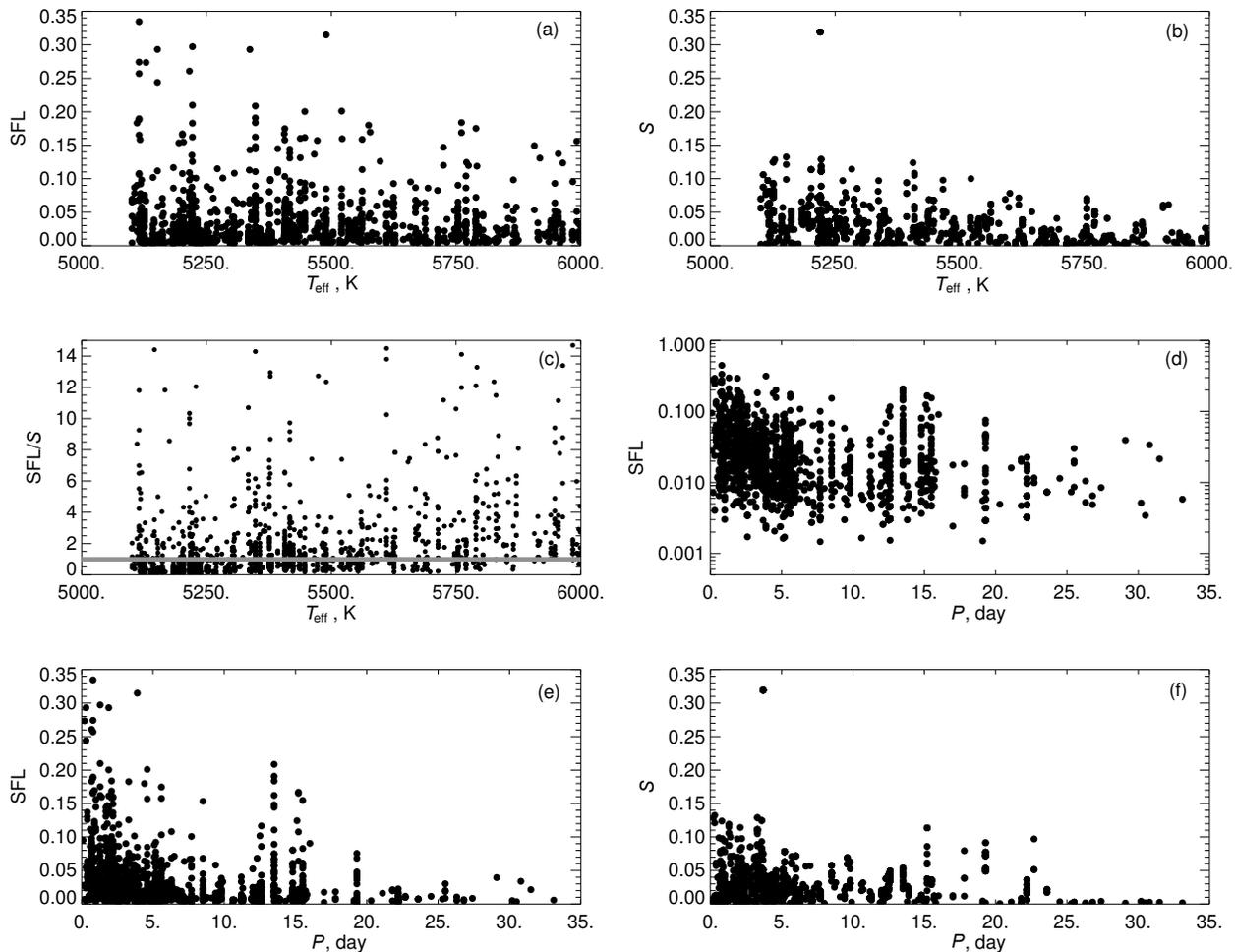


Рис. 1. Распределения по эффективной температуре: (а) площадей вспышек SFL и (б) площадей холодных пятен S на поверхности изученных звезд, (с) отношения параметров SFL и S (сплошная линия соответствует отношению, равному 1). (д, е, ф) Величины SFL и S в зависимости от периода осевого вращения звезд P , на диаграмме (д) ось ординат приведена в логарифмической шкале. Выделяющийся объект с S выше 0.3 — звезда KIC 7174505.

рис. 1с. Несмотря на то что диапазон их изменений значителен (от 0 до 15–20), подавляющее большинство данных указывает на величины отношения в диапазоне 0.3–0.8 с возможным незначительным увеличением этих величин для более горячих звезд.

Можно заключить, что в рамках принятой нами простой модели при значении $T_{\text{ВВ}} = 20\,000$ К площади вспышек (для многих событий) составляют около половины площади пятен. Этот вывод является достаточно условным: так, например, если принять значение параметра $T_{\text{ВВ}} = 10\,000$ К, то рассматриваемое отношение будет лежать в пределах от 2 до 6 (площади вспышек значительно превосходят площади пятен).

На рис. 1д приводятся найденные нами величины SFL в зависимости от периода осевого вращения звезд P . Подобно тому, как это было сделано нами в [2] при анализе аналогичной зависимости для S , можно предположить возможное

присутствие у данных на диаграмме бимодального распределения с провалом для объектов с P около десяти суток. Как отмечалось в [2], вследствие того, что данные для группы объектов с периодами более десяти суток сравнительно малочисленны, нет ответа на вопрос о том, одинаковы ли максимальные значения площадей вспышек у звезд с периодами вращения менее десяти суток и более десяти суток. Если рассматривать только группу звезд с P менее десяти суток (рис. 1е), то приведенные данные могут указывать на уменьшение площадей вспышек при увеличении величины P (аналогично для параметра S , рис. 1ф).

Наконец, рис. 2 иллюстрирует сопоставление величин S и SFL между собой. Было бы естественно ожидать наличие определенной корреляции между этими величинами, однако из результатов наших вычислений, базирующихся на данных из [1], этого не следует. Напротив, можно сделать вывод о том, что у одной и той же звезды при малых

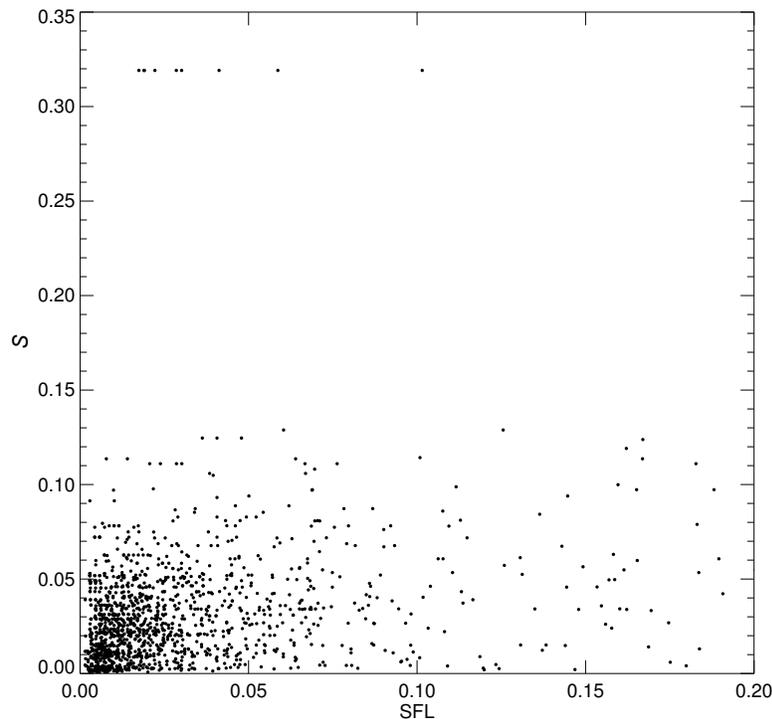


Рис. 2. Сопоставление величин S и SFL . Выделяющийся объект с S выше 0.3 — звезда KIC 7174505.

изменениях S могут наблюдаться как значительные изменения энергии вспышек (см. [2, 4]), так и изменения размеров площади вспышек). При практически одинаковых площадях пятен энергии вспышек и их площади могут изменяться вплоть до двух порядков. Нам представляется важным проверить это заключение по другим наборам данных, помимо [1], как только такие данные будут доступны.

3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Как и в случае изучения вспышек на звездах поздних спектральных классов (холоднее, чем наше Солнце), анализ супервспышек у звезд солнечного типа может отталкиваться только от солнечных аналогий (данных о детально изученных вспышках по наземным наблюдениям и многочисленным специализированным космическим миссиям). При этом в ходе солнечных и звездных вспышек регистрируется излучение в линиях и континууме в диапазоне длин волн от рентгеновского до радио. Значительная часть излучения приходит в голубом и ближнем ультрафиолетовом диапазонах длин волн, его часто называют излучением в белом свете.

Проведя аналогию с Солнцем, авторы многих исследований (см., например, [6, 12]) предполагают, что районы вспышек на вспыхивающих звездах связаны с комплексом аркад последовательно перезапускающихся магнитных петель. Родившийся

при перезапании петель поток нетепловых электронов, достигая нижней атмосферы, приводит к возникновению излучения в линиях и в континууме. Большое число излучающих областей увеличивает продолжительность вспышек. Так, согласно [1], несколько десятков объектов имели вспышки продолжительностью более 0.2 суток, а зарегистрированная в белом свете мегавспышка карликовой $dM4.5e$ -звезды YZ CMi длилась более семи часов [12].

Спектральные наблюдения вспыхивающих звезд показали, что излучение вспышек может в первом приближении рассматриваться как сумма двух компонент — чернотельного излучения (ВВ) и излучения в бальмеровском континууме (BaC) и в линиях. Для относительных факторов заполнения этих компонент было показано, что излучение в бальмеровском континууме приходит из областей, больших по площади (из вспыхивающих петель, достигающих до уровня хромосферы). В спектральном диапазоне с длинами волн свыше 400 нм излучение носит чернотельный характер (по-видимому, именно эта компонента излучения и регистрируется при монохроматических наблюдениях супервспышек звезд солнечного типа с космическим телескопом Kepler). ВВ-компонента формируется, вероятно, у оснований арок вспышек в нижней атмосфере. В случае исследования мегавспышки карликовой $dM4.5e$ -звезды YZ CMi Ковальски и др. [12] установили, что ВВ-излучение формируется в областях в 3–16 раз

меньших по размерам, чем области формирования ВаС-излучения, причем со временем появляется антикорреляция между интенсивностью излучения этих компонент. Температура ВВ-излучения при мегавспышке звезды YZ CMi по оценке [12] составляла около 10 000 К. По оценке [7] температура ВВ-излучения при вспышке звезды EV Lac достигала величины 18 500 К. Имеющиеся в нашем распоряжении монохроматические наблюдения супервспышек звезд солнечного типа с телескопом Kepler не позволяют оценить температуру излучения чернотельной компоненты (а также присутствие и вклад ВаС-составляющей). Оценивая площади вспышек, мы установили, что при величине $T_{ВВ}$, равной 20 000 К, площади вспышек составляют около половины площадей пятен. Если предположить, как в [1], что $T_{ВВ}$ равна 10 000 К, то площади вспышек будут уже превышать площади холодных магнитных пятен. Важность получения наиболее точных значений величин площадей вспышек и площадей пятен очевидна: так, например, в [1] оценки энергетики вспышек основаны на оценках SFL, в [13] оценки величины магнитной энергии, накапливающейся в магнитных элементах и высвобождающейся при вспышках, также базируются на оценках размеров магнитных областей.

4. ВЫВОДЫ

Продолжен анализ свойств активных областей (холодных пятен) на поверхности 279 звезд спектрального класса G, у которых было открыто более полутора тысяч супервспышек с энергиями в диапазоне 10^{33} – 10^{36} эрг. Выполнены вычисления и проведены сопоставления параметров запятненности S и параметра SFL (доля поверхности звезды, которая излучает в ходе вспышки).

Получены следующие результаты:

- (1) Найдены оценки SFL из соотношения, связывающего эту величину с амплитудой вспышки и ее излучением в предположении о чернотельном характере излучения вспышки в моменты, близкие к ее максимуму. По этому соотношению в предположении о температуре $T_{ВВ} = 20\,000$ К по данным о 1547 вспышках из [1] мы определили величины SFL для 279 звезд солнечного типа с супервспышками. По нашим оценкам большинство величин SFL находятся в интервале 0–0.1, достигая для отдельных сильных вспышек величин 0.2–0.4.
- (2) Зависимость SFL от эффективной температуры для звезд с супервспышками повторяет по характеру установленную нами ранее зависимость для запятненности. Распределение SFL достигает своего максимума в области температур

5100–5250 К и спадает при увеличении эффективной температуры.

- (3) В рамках принятой нами модели при значении параметра $T_{ВВ} = 20\,000$ К величины площади вспышек составляют около половины величин площадей пятен для большинства объектов (с разбросом величин отношения SFL/ S вплоть до 8–10). Если принять значение параметра $T_{ВВ} = 10\,000$ К, то рассматриваемое отношение будет лежать в пределах от 2 до 6 (т.е. площади вспышек превосходят площади пятен).

- (4) Высказано предположение о присутствии у данных на диаграмме «SFL–период вращения P » бимодального распределения с провалом для объектов с периодом около десяти суток. Для группы звезд с P менее десяти суток приведенные данные могут указывать на уменьшение площадей вспышек при увеличении значения P .

- (5) Наш анализ показал, что у одной и той же звезды при малых изменениях S изменения энергии вспышек (размеров площади вспышек) могут быть значительными. Представляется важным проверить это заключение по другим наборам данных, помимо [1].

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарны команде космического телескопа Kepler и команде архива MAST (архив Б. А. Микульски для космических телескопов) за возможность использования данных наблюдений. Настоящая работа выполнена при поддержке программы фундаментальных исследований Президиума РАН «Переходные и взрывные процессы в астрофизике» (П-41) и частично гранта РФФИ 14-02-92694 ИНД_а «Магнитная активность холодных маломассивных звезд.»

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. T. Shibayama, H. Maehara, S. Notsu, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **209**, 1 (2013).
2. I. S. Savanov, *Astrophysical Bulletin* **70**, 292 (2015).
3. T. Reinhold, A. Reiners, and G. Basri, *Astron. and Astrophys.* **560**, A4 (2013).
4. I. S. Savanov and E. S. Dmitrienko, *Astronomy Reports* **59**, 879 (2015).
5. R. E. Gershberg, *Solar-Type Activity in Main-Sequence Stars* (Springer, Berlin, 2005).
6. A. F. Kowalski, S. L. Hawley, J. P. Wisniewski, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **207**, 15 (2013).
7. B. E. Zhilyaev, Ya. O. Romanyuk, O. A. Svyatogorov, et al., *Astron. and Astrophys.* **465**, 235 (2007).
8. I. S. Savanov and K. G. Strassmeier, *Astronomische Nachrichten* **329**, 364 (2008).
9. I. S. Savanov and E. S. Dmitrienko, *Astronomy Reports* **55**, 890 (2011).

10. I. S. Savanov and E. S. Dmitrienko, *Astronomy Reports* **56**, 116 (2012).
Astrophys. J. **714**, L98 (2010).
11. I. S. Savanov, *Astronomy Reports* **53**, 1032 (2009).
13. Y. Notsu, T. Shibayama, H. Maehara, et al.,
Astrophys. J. **771**, 127 (2013).
12. A. F. Kowalski, S. L. Hawley, J. A. Holtzman, et al.,

Parameters of Superflares on G-Type Stars Observed with the Kepler Space Telescope

I. S. Savanov and E. S. Dmitrienko

We continued the analysis of 279 G-type stars with superflares (energies in the range of 10^{33} – 10^{36} erg). We calculated the SFL parameter (part of the stellar surface which emits in the flare). The SFL estimates were derived from the relation connecting this value with the amplitude of the flare and its radiation on the assumption of the blackbody character of the emission at times close to its maximum. Most SFL values are in the range of 0–0.1, with values of 0.2–0.4 for some strong flares. Dependence of SFL on effective temperature for stars with superflares is similar to that found earlier for the spottedness parameter S . The SFL distribution reaches its maximum in the temperature range of about 5100–5250 K and decreases with the effective temperature increase. We suggested an assumption on the presence of bimodal distribution in the “SFL–rotation period” relation with a gap for objects with rotation periods P of about 10 days. For stars with P less than 10 days, the given data can indicate a decrease in flare areas with the P increase. Our analysis showed that significant changes both in flare energy and in flare areas can be achieved with small changes in spottedness S for one and the same star.

Keywords: *stars: activity—stars: flare—starspots*