ПИСЬМА В АСТРОНОМИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ, 2022, том 48, № 4, с. 290–298

АКТИВНОСТЬ МОЛОДОЙ ЗВЕЗДЫ С ЭКЗОПЛАНЕТОЙ КЕПЛЕР-1627

© 2022 г. И. С. Саванов[1*]

[1] Институт астрономии РАН, Москва, Россия

Поступила в редакцию 07.02.2022 г.
После доработки 13.03.2022 г.; принята к публикации 13.03.2022 г.

На основе данных архива космического телескопа Кеплер проведено исследование фотометрической переменности молодого солнечного аналога Кеплер-1627 — звезды спектрального класса G8V с планетой размером 3.777 радиусов Земли и периодом обращения ~7.2 сут. Кеплер-1627 является членом скопления δ Lyr с возрастом 38 млн лет и в настоящее время системой с самой молодой планетой с точным возрастом, обнаруженной основной миссией Кеплер. Мы нашли величины периода вращения звезды $P = 2.606 \pm 0.020$ сут, параметра дифференциального вращения звезды $\Delta\Omega = 0.066 \pm 0.011$ рад/сут и амплитуды переменности блеска, а также по стандартной методике оценили величины параметра запятненности Кеплер-1627, которые лежат в интервале 1.1–6.5% от площади поверхности звезды. В абсолютной мере площадь пятен на поверхности Кеплер-1627 превосходит максимальную площадь пятен на Солнце и изменяется от 11 700 до 68 200 м.д.п. при среднем значении 34 560 м.д.п. Высказано предположение, что в течение интервала наблюдений площадь пятен на поверхности звезды обладала циклическими изменениями, подобными периодичности Ригера на Солнце. У звезды обнаружены высокая вспышечная активность (зарегистрировано 88 вспышек с энергией $\lg E$ в диапазоне от 33.41 до 35.25) и пятенная активность. Рассмотрены возможные проявления цикличности во вспыхивающей активности Кеплер-1627. Найдены величины индекса хромосферной активности $\lg R'_{HK}(T_{\rm eff})$ для Кеплер-1627, которые независимо свидетельствуют о молодости объекта.

Ключевые слова: звезды, экзопланеты, активность.

DOI: 10.31857/S0320010822040040

ВВЕДЕНИЕ

Свойства формирующихся планет в молодых планетных системах в значительной мере являются отражением продолжающихся процессов выпадения планетеземалей, а также магнитной активности молодой звезды, которая проявляется в ее избыточном УФ и рентгеновском излучениях. Перечисленные факторы могут изменять физические свойства (вплоть до разрушения) атмосфер близких планет. Поиску и изучению свойств молодых планетных систем посвящены серии исследований, объединенные программами ZEIT (поиск зодиакальных экзопланет во времени) и THYME (TESS Hunt for Young and Maturing Exoplanets), основанные на фотометрических наблюдениях космического телескопа Кеплер (главным образом, продолжении его миссии K2) и миссии TESS. До недавнего времени среди планет, открытых основной миссией космического телескопа Кеплер, не было молодых. Ситуация изменилась после появления расширенного исследования Боума и др. (2021) планетной системы Кеплер-1627 (KIC 6184894).

Согласно Боума и др. (2021), Кеплер-1627 является молодой звездой спектрального класса G8V, известной тем, что у нее есть планета с радиусом 3.777 радиусов Земли (0.377 радиусов Юпитера, 0.039 радиусов звезды), обращающаяся вокруг нее на расстоянии в 17.606 радиусов звезды с периодом ~7.2 сут. Блеск объекта в фильтре V составляет $13^m.11 \pm 0^m.08$.

По данным Боума и др. (2021) эффективная температура звезды составляет 5505 ± 60 K, ускорение силы тяжести — $\lg g = 4.53 \pm 0.05$, масса — $0.881 \pm 0.018 M_\odot$, радиус — $0.953 \pm 0.019 R_\odot$. Как указывалось, фотометрические наблюдения звезды были выполнены космическим телескопом Кеплер. Кеплер-1627 находится от нас на расстоянии в 329.5 ± 3.5 пк (Gaia EDR3 parallax (mas) — 3.009 ± 0.032). Используя данные Gaia, данные о перио-

*Электронный адрес: igs231@mail.ru

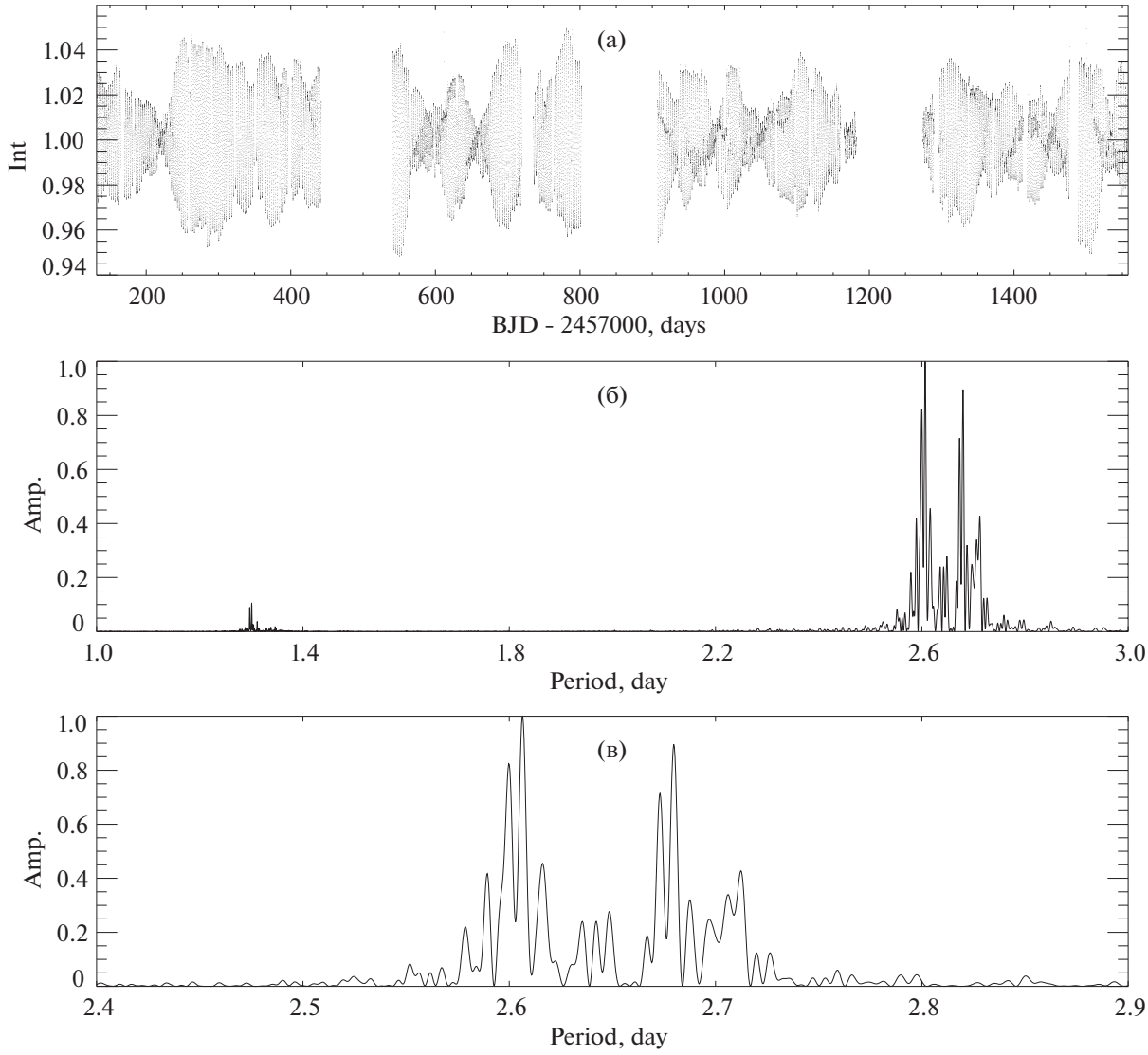

Рис. 1. (а) — Кривая блеска Кеплер-1627 по данным, доступным из архива космического телескопа Кеплер; (б), (в) — спектры мощности для диапазонов периодов 1–3 сут и 2.4–2.9 сут соответственно.

дах вращения звезд и спектроскопические оценки содержания лития, Боума и др. (2021) показали, что Кеплер-1627 является членом скопления δ Lyr с возрастом 38 млн лет. Это обстоятельство делает Кеплер-1627 самой молодой планетной системой с точным возрастом, обнаруженной основной миссией Кеплер. Боума и др. (2021) сделали заключение о том, что фотометрические наблюдения телескопа Кеплер указали на особенности транзитов: например, средний профиль прохождения асимметричен.

Цель нашей работы состоит в изучении активности звезды с планетной системой Кеплер-1627 (молодого активного аналога Солнца) по результатам фотометрических наблюдений космического телескопа Кеплер.

АНАЛИЗ ФОТОМЕТРИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ КЕПЛЕР-1627

Мы рассмотрели 14 сетов наблюдений системы Кеплер-1627, доступных из архива космического телескопа Кеплер (они представлены на рис. 1а). Обработка данных была аналогична выполненной нами ранее (см., например, Саванов, 2021). Как и в наших предыдущих исследованиях были использованы модули разработанного нами пакета программ *activity*. Описание и результаты применения пакета программ *activity* при исследовании звезд спектрального класса A представлены в Саванов (2018). При этом использовалась последняя версия исправления кривых блеска за инструментальные эффекты, доступная в архиве. Для дальнейше-

го анализа было отобрано в совокупности 50 173 единичных измерений блеска за период наблюдений в 1426.45 сут (3.9 лет). Отметим, что большим достоинством наблюдений основной миссии Кеплер по сравнению с K2 или TESS является их значительная продолжительность.

На спектре мощности для Кеплер-1627 имеется доминирующий пик, соответствующий фотометрическому периоду вращения звезды $2.606 \pm \pm 0.020$ сут, который несколько отличается от установленного в Боума и др. (2021): 2.642 ± 0.042 сут. Помимо указанного пика, имеется ряд других пиков различных амплитуд. Отметим еще один, соответствующий периоду в 2.679 ± 0.020 сут. Происхождение этих пиков может быть связано, например, с наличием у звезды, обладающей дифференциальным вращением, пятен (или групп пятен), расположенных на различных широтах. При этом изменения периодов переменности блеска могут соответствовать изменениям и эволюции (появлению и исчезновению) активных областей, лежащих на различных широтах на поверхности звезды. Наконец, подчеркнем, что на спектре мощности имеется слабый пик, который соответствует половинному фотометрическому периоду вращения звезды ($\sim$1.3 сут). Данное обстоятельство, вероятнее всего, вызвано наличием в отдельных интервалах наблюдений двух ярко выраженных сопоставимых по величине активных областей на противоположных полушариях звезды, появление и исчезновение которых приводят к фотометрической переменности с периодом, величина которого составляет половину от периода вращения звезды вокруг своей оси.

По методике, опубликованной Рейнхольд и Гизо (2015) для определения параметров дифференциального вращения 12 300 звезд по наблюдениям с телескопом Кеплер, с найденными нами значениями P (2.606 и 2.679 сут) мы выполнили оценки параметров дифференциального вращения звезды $\Delta\Omega$ (различие угловых скоростей вращения на экваторе и на полюсе). Таким образом, по нашей оценке Кеплер-1627 имеет параметр $\Delta\Omega = 0.066 \pm \pm 0.011$ рад/сут, что сопоставимо с его величиной для других звезд с близкими по величине эффективными температурами (Рейнхольд, Гизо, 2015).

Весь наблюдательный материал был разделен на 422 сета, каждый из которых последовательно охватывает один период вращения звезды. По стандартной методике нами были найдены величины параметра запятненности Кеплер-1627. По нашим оценкам они лежат в интервале 1.1–6.5% от площади поверхности звезды. Принимая величину радиуса звезды $R = 0.953 \pm 0.019 R_\odot$ из Боума и др. (2021), можно получить величину A площади поверхности звезды в абсолютной мере (в миллионных долях видимой полусферы Солнца, м.д.п.). По характеристикам фотосферы Кеплер-1627 принадлежит к числу звезд солнечного типа, однако площадь пятен на его поверхности превосходит максимальную площадь пятен на Солнце и изменяется от 11 700 до 68 200 м.д.п. Среднее значение параметра A составляет 34 560 м.д.п. На Солнце средние по размерам пятна имеют площадь 10–200 м.д.п., наибольшие же не превышают 5000 м.д.п. (детали см. в Наговицын, Певцов, 2021).

Можно предположить, что в течение интервала наблюдений площадь пятен на поверхности звезды обладала циклическими изменениями (рис. 2). Характерные времена изменений могут составлять 80, 135 и 460 сут, амплитудный спектр мощности, построенный по 422 оценкам параметра A, приведен на рис. 2б. На рис. 2в представлена фазовая кривая, полученная при свертке с величиной цикла 460 сут.

Цикл такой продолжительности может рассматриваться как аналог так называемой солнечной периодичности Ригера с продолжительностью 154 сут (155–160 сут, Ригер и др., 1984; Гургенашвили и др., 2017, 2021). Примеры наличия данной периодичности у звезд немногочисленны (см., например, Масси и др., 2005; Архипов, Ходаченко, 2021). Также примером является наше исследование (Саванов, 2021) фотометрической переменности карлика спектрального класса K1 AB Pic (HD 44627) — члена Tuc-Hor ассоциации, обладающего удаленной планетой гигантом.

ВСПЫШЕЧНАЯ АКТИВНОСТЬ

Каталог вспышек, зарегистрированных основной миссией Кеплер, опубликованный Янг и Лиу (2019), включает сведения о 162 262 вспышках для 3420 звезд. Тщательный анализ, проведенный авторами каталога, позволил выявить проблемы, связанные с наличием в каталогах такого рода различных ложных сигналов и артефактов. Одним из удивительнейших открытий, сделанных на основе данных космического телескопа Кеплер, является обнаружение звездных супервспышек. Супервспышками принято называть более сильные явления, чем типичные солнечные вспышки, их общая энергия варьируется от 10^{33} до 10^{38} эрг. Энергия супервспышки настолько высока, что она несомненно может сильно влиять на атмосферы близлежащих экзопланет. Результаты широкого круга исследований, включающих анализ свойств вспышек у быстро и медленно вращающихся звезд, связи площади пятен звезд и энергий их вспышек, возможности супервспышек на Солнце и пр. можно найти в сериях статей H. Maehara, Y. Notsu, N. Shibayama, опубликованных в разные годы.

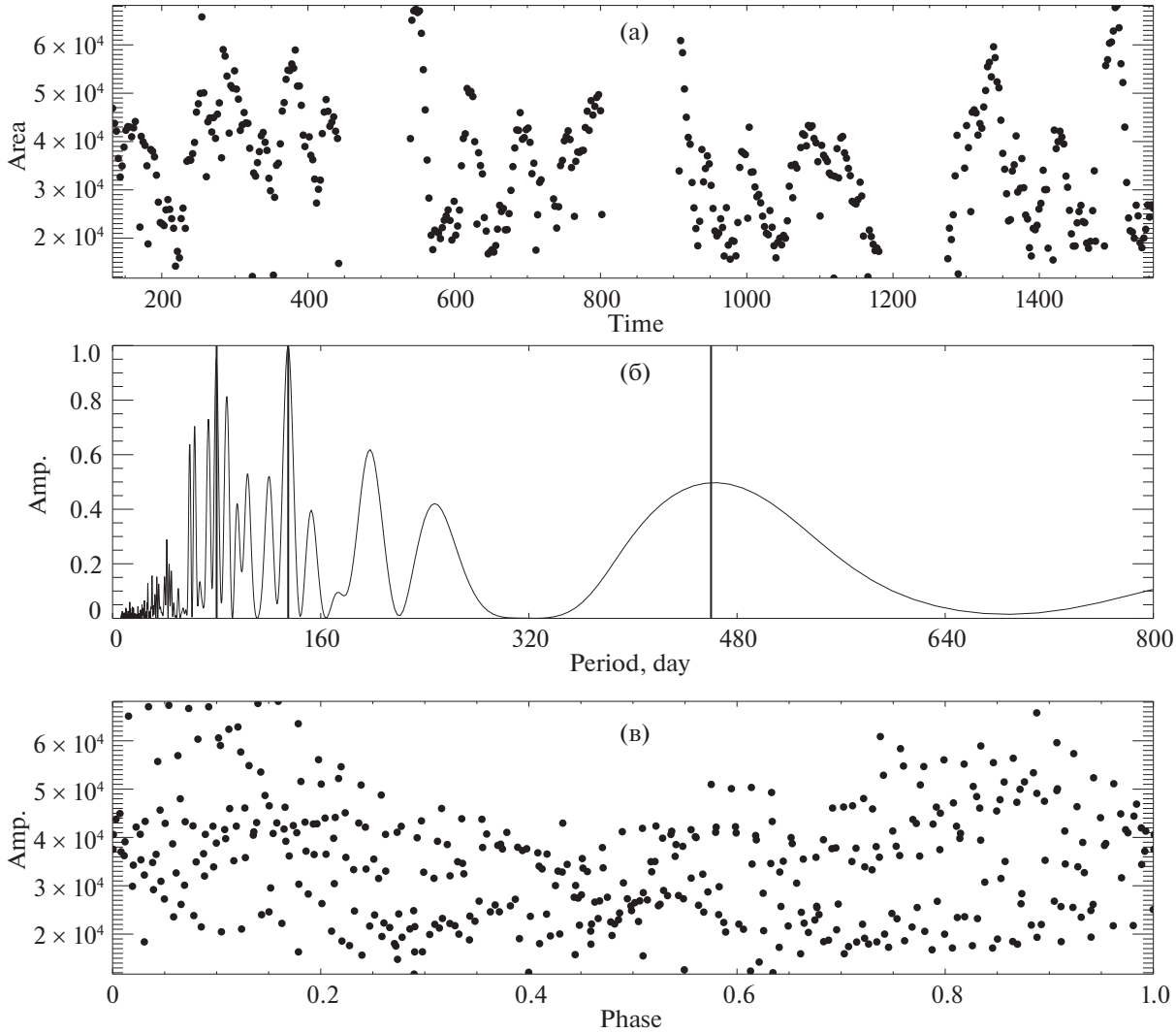

Рис. 2. (а) — Изменения параметра запятненности A. (б) — Амплитудный спектр мощности, вертикальные линии соответствуют величинам 80, 135 и 460 сут (см. текст). (в) — Фазовая диаграмма, полученная при свертке с величиной цикла 460 сут.

Для того чтобы оценить влияние вспышечной активности на происхождение и эволюцию экзопланет, многие группы исследователей приступили к анализу частоты и амплитуд вспышек для звезд с планетными системами. В каталоге Янг и Лиу (2019) содержатся данные о вспышечной активности Кеплер-1627. Всего приводятся сведения о 88 вспышках с энергией $\lg E$ в диапазоне от 33.41 до 35.25. На рис. 3 (верхний ряд) приводятся данные об изменении вспышечной активности объекта в течение наблюдений с космическим телескопом Кеплер (слева) и спектр мощности, построенный по этим данным (справа). Спектр мощности характеризуется значительной зашумленностью, на нем имеются пики, соответствующие периодам в интервале 1–8 сут, но ни один из них не совпадает с периодами вращения звезды, планеты или их комбинациями. Отметим, что если не рассматривать вспышки с энергией $\lg E$ больше 34.4, то можно предположить, что уровень вспышечной активности звезды остается примерно постоянным и находится в диапазоне 33.5–34.4.

В дополнение к данным наблюдений длительной каденции (LC мода) за 3.9 года, в течение сета Q15 были получены наблюдения с короткой каденцией (1 мин, SLC мода) длительностью 97.7 сут. Поскольку в этом случае кривая блеска позволяет более детально анализировать профили вспышек и регистрировать более слабые вспышки, чем при наблюдениях в LC моде, Боума и др. (2021) смогли выделить 24 вспышки, которые длились в общей сложности 6.5 ч. При этом было отмечено следу-

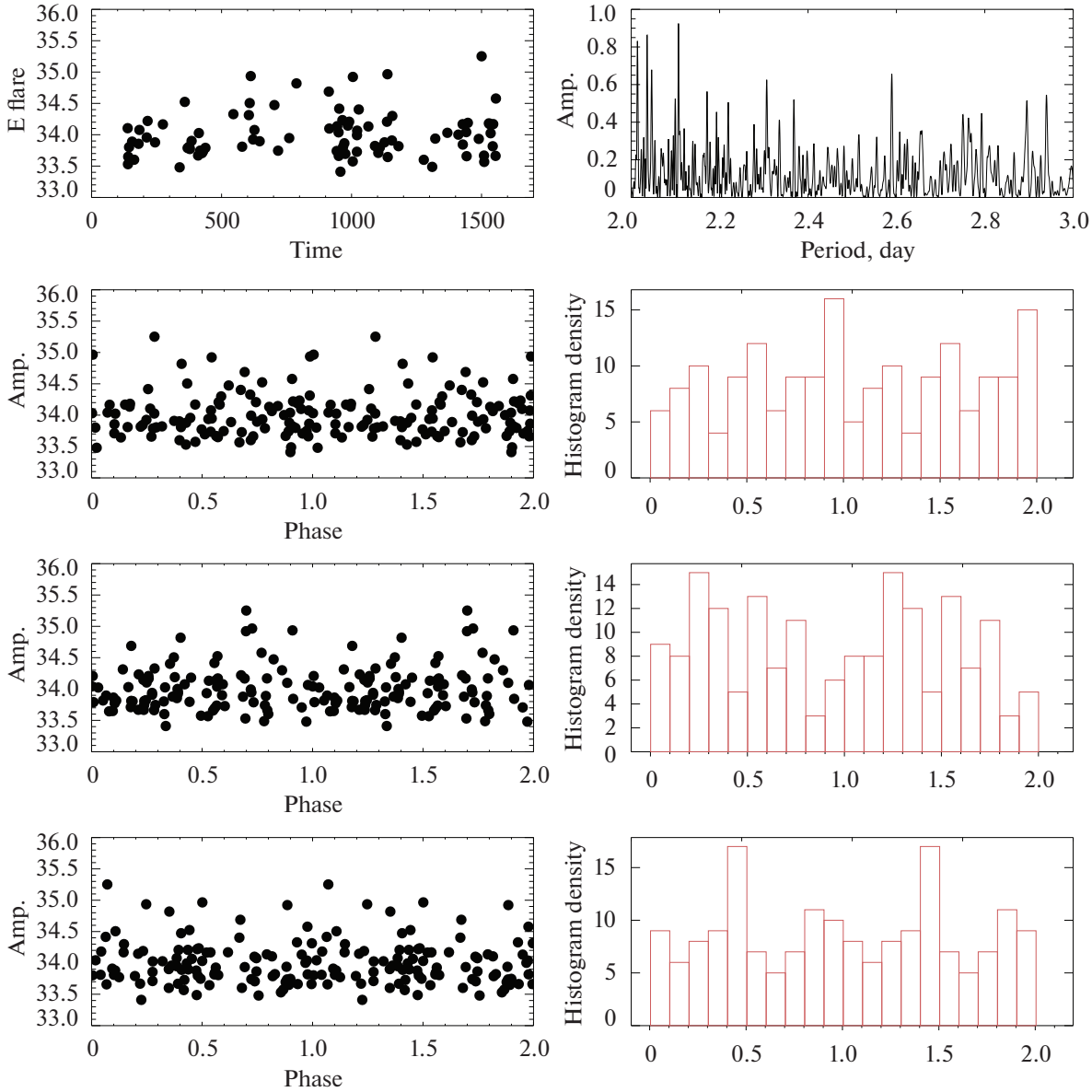

Рис. 3. Верхний ряд — изменения вспышечной активности объекта в течение наблюдений с космическим телескопом Кеплер (слева) и спектр мощности, построенный по этим данным (справа). Фазовые кривые величин $\lg E$ и гистограммы распределения фаз для $P_{\rm rot}$, $P_{\rm orb}$, $P_{\rm об}$ (вторая, третья и четвертая строки рисунка соответственно).

ющее обстоятельство, связанное с промежутками времени между вспышками и заключающееся в том, что в двух случаях через один орбитальный период после самой яркой вспышки последовала вторая вспышка. Эти события показаны на рис. 13 в работе Боума и др. (2021). Согласно Боума и др. (2021), если рассматривать вспышки, происходящие в пределах 2% от орбитального периода планеты после предыдущей вспышки, то уже у 4 из 24 событий есть возможные преемники — вспышки. Несмотря на малое число событий, Боума и др. (2021) сделали попытку проанализировать достоверность полученного результата.

Мы провели несколько иную процедуру выявления связи событий (вспышек) с периодами вращения звезды $P_{\rm rot}$, орбитального вращения планеты $P_{\rm orb}$ и обобщенного периода $P_{\rm об}$ (см. ниже). На рис. 3 представлены фазовые кривые величин $\lg E$ и гистограммы распределения фаз для перечисленных периодов (вторая, третья и четвертая строки диаграммы). Для системы Кеплер-1627 $P_{\rm orb}/P_{\rm rot} = 2.76$, что означает, согласно Боума и др. (2021), что каждые 4 транзита и 11 вращений

звезды планета пересекает примерно одну и ту же звездную долготу. На нижней строке диаграммы рис. 3 представлены фазовая кривая величин $\lg E$ и гистограмма распределения фаз для величины обобщенного периода $P_{\text{об}} = 4 \times P_{\text{orb}} (= 11 \times P_{\text{rot}})$. Форма фазовых кривых не дает указаний на переменность с рассматриваемыми периодами, но сгущение точек на ряде фаз может свидетельствовать о наличии эффекта, подобного установленному в Боума и др. (2021) и связанному с промежутками времени между вспышками. На соответствующих гистограммах в этом случае наблюдается повышенное число событий. Оно наиболее хорошо проявляется по данным для обобщенного периода $P_{\text{об}}$: число событий для фазы порядка 0.5 примерно в 2 раза больше, чем для остальных фаз. Повышенное число событий также заметно для P_{rot} (фаза около 0.1) и, возможно, присутствует для P_{orb} (максимум для фазы 0.3, минимум — 0.9).

Явления, связанные с наличием или отсутствием периодичности во вспышечной активности звезд, представляют большой интерес (это очень обширная область исследований, см., например, обсуждения в статьях Дойл и др., 2020, включая результаты для звезд с планетами и др.), они требуют дальнейшего исследования с привлечением новых наблюдательных данных и, вероятно, они могут быть дополнены анализом временных характеристик распределения вспышек.

Результаты одного из последних исследований вспышечной активности звезд солнечного типа представлены Окамото и др. (2021). Ими были рассмотрены звезды главной последовательности спектрального класса G с эффективной температурой в интервале 5100–6000 K, для которых имеются наблюдательные данные основной миссии Кеплер и каталога Gaia Data Release 2. В итоге Окамото и др. (2021) представили данные о 2341 супервспышке у 265 звезд солнечного типа. На рис. 4 приведена диаграмма, связывающая энергии вспышек с площадью холодных пятен на поверхности изученных в Окамото и др. (2021) звезд. Каталог Окамото и др. (2021) не содержит исследуемой нами и Боума и др. (2021) звезды Кеплер-1627 (хотя данные о ее вспышечной активности приводятся в Янг, Лиу, 2019). На рис. 4 вертикальная светлая линия характеризует диапазон энергий вспышек этой звезды и ее запятненность. Можно заключить, что вспышечная активность Кеплер-1627 сопоставима с аналогичными объектами из Окамото и др. (2021). Используя данные, полученные из Exoplanet Archive 12 по состоянию на 28 мая 2020 г., Окамото и др. (2021) отметили, что в их списке нет ни одной звезды с подтвержденной экзопланетой, но присутствуют три возможных кандидата: KIC 008946267, KIC 008040308, KIC 008822421, и три отвергнутых кандидата: KIC 005991070, KIC 008285970, KIC 012207117. Благодаря 2021arXiv211214776B, Кеплер-1627 (KIC 6184894) может рассматриваться в настоящее время как единственный объект с супервспышками и с подтвержденной экзопланетой. Однако это не может изменить один из главных выводов исследования Окамото и др. (2021) (а также исследования разных лет Ту с соавторами, например, Ту и др., 2020, выполненных на основе наблюдений с космической миссией TESS) о том, что наличие экзопланеты не является причиной появления супервспышек (по крайней мере, для звезд солнечного типа).

ТРАНЗИТЫ И ХРОМОСФЕРНАЯ АКТИВНОСТЬ

Данные наблюдений телескопа Кеплер содержат дополнительную информацию о транзитах планеты — наличие асимметрии формы транзита. Одно из возможных объяснений такой асимметрии, показанной на рис. 5 в Боума и др. (2021), по мнению авторов, может быть связано с асимметричным оттоком пыли: теоретически для молодых мини-нептунов может ожидаться наличие пылевых потоков. Вторая возможность заключается в том, что орбита планеты смещена относительно оси вращения звезды и имеет тенденцию проходить через группы звездных пятен на соответствующей широте. Следует иметь в виду, что при этом требуется привлечение достаточно сложной геометрической модели с учетом того, что период обращения планеты (~7.2 сут) и период вращения звезды (~2.6 сут) не являются кратной комбинацией (см. обсуждение выше). Однако установленная нами высокая пятенная активность Кеплер-1627 может быть рассмотрена как аргумент в пользу этого предположения.

Планета системы Кеплер-1627 принадлежит к одним из самых молодых известных планет, для которых обсуждается предположение о их значительном размере (см., например, рис. 8 в Боума и др., 2021), большем, чем у аналогичных более старых планет. К числу других молодых сопоставимых систем с точным возрастом следует отнести K2-33, DS Tuc, HIP 67522, TOI 837, AU Mic (две планеты) и V1298 Tau (4 планеты) (см. обсуждение в Боума и др., 2021). Отметим, что планета системы Кеплер-1627 является одной из наименее крупных в этой выборке (ее радиус равен 3.82 ± 0.16 радиусов Земли), что может быть связано с эффектами отбора, обусловленными фотометрической переменностью, вызванной пятнами; данные более высокого фотометрического качества для этой звезды были получены в ходе основной миссии Кеплер и пр. Таким образом, большой размер планеты Кеплер-1627 (и других молодых планет) по сравнению с большинством мини-нептунов может

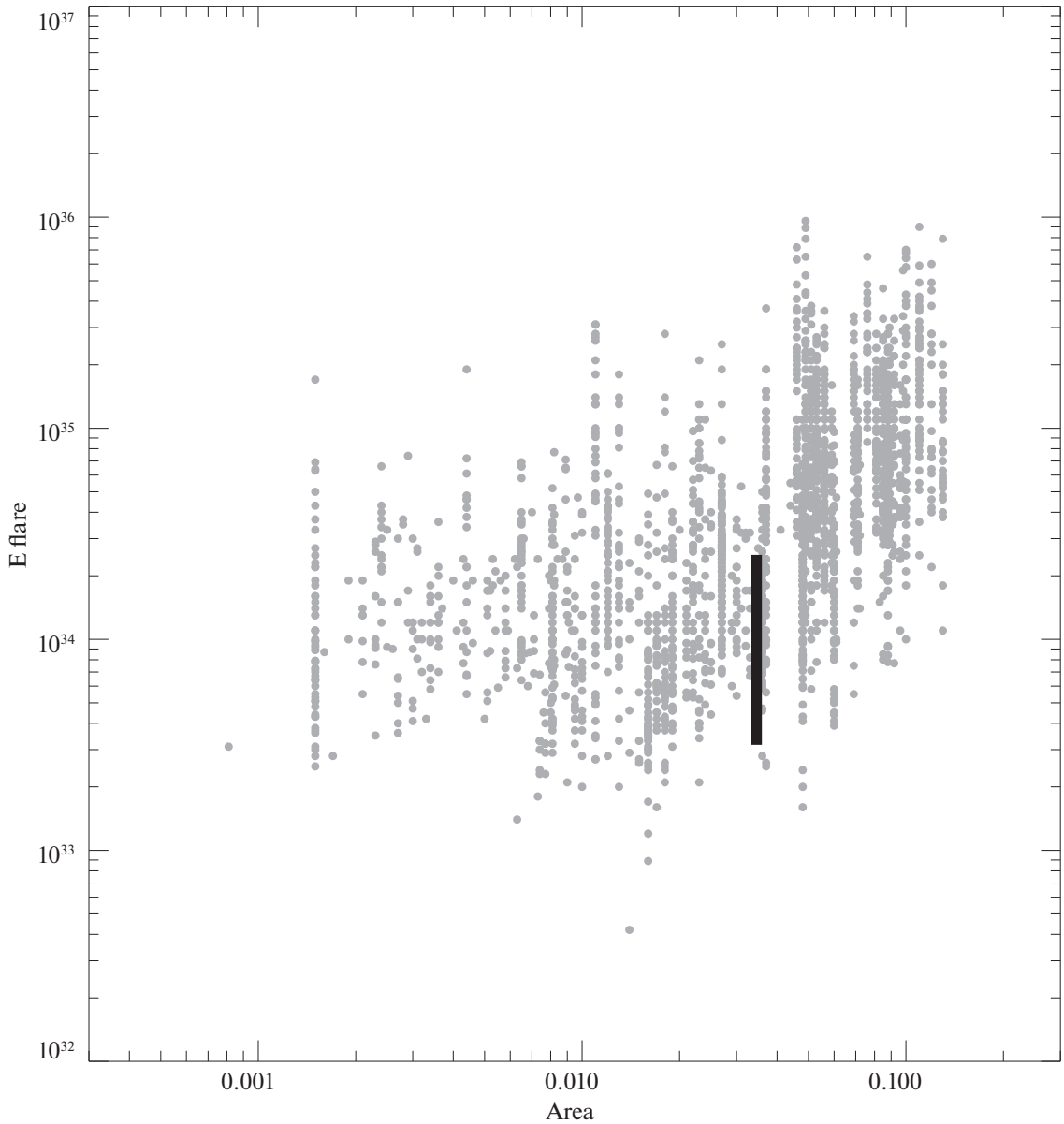

Рис. 4. Зависимость энергии вспышек от доли поверхности звезд с супервспышками, покрытой холодными пятнами. Светлые кружки — данные для звезд, изученных в Окамото и др. (2021). Вертикальная темная линия характеризует диапазон энергий вспышек Кеплер-1627 и ее запятненность.

подтвердить сценарий, в котором типичный мини-нептун теряет значительную часть своей первоначальной атмосферы в течение сотен миллионов лет (см. ссылки на статьи Owen et al. и Ginzburg et al. в Боума и др., 2021).

Боума и др. (2021) выполнили дополнительные спектральные и фотометрические (с *griz*-фильтрами) наземные наблюдения Кеплер-1627 7 августа 2021 г. с помощью телескопов Keck-I и MuSCAT3 (в обсерватории Халеакала) (см. приложение C в их статье). Хотя по спектральным наблюдениям аномалия Росситера–Маклафлина обнаружена не была, многополосные кривые блеска показали, что транзит является ахроматическим, и что в целом эти данные соответствуют модели, установленной по наблюдениям с телескопом Кеплер. По наблюдениям с MuSCAT3 было найдено, что продолжительность транзита короче, чем по данным архива Кеплер. Однако отсутствие вариации времени транзита по данным архива Кеплер, относительно низкое отношение сигнал/шум наземных наблюдений свидетельствуют о том, что лишь дальнейшие фотометрические наблюдения позволят определить, действительно ли меняется

продолжительность транзита. К сожалению, точность спектральных наблюдений не позволила Боума и др. (2021) сделать заключения о направлении обращения планеты (прямое или ретроградное) и о наклонении ее орбиты.

Полученные Боума и др. (2021) по спектральным наблюдениям значения индексов хромосферной активности S позволяют провести независимую оценку возраста звезды. Для этого мы применили методику и подходы, развитые Лоренцо-Оливейра и др. (2018), которые измерили S индексы активности (по линиям Ca II H и K), используя примерно 9000 спектров, полученных со спектрографом HARPS, для 82 звезд — солнечных близнецов. Авторы провели уточнение методики преобразования индекса активности в шкалу S Маунт–Вилсона (S_{MW}) и привели зависимости для вычисления индекса активности $\lg R'_{HK}(T_{\rm eff})$. В итоге Лоренцо-Оливейро и др. (2018) получили соотношение, связывающее индекс активности $\lg R'_{HK}(T_{\rm eff})$ с возрастом объектов. Используя перечисленные выше подходы, мы смогли перейти от измеренных в Боума и др. (2021) индексов активности S к индексу активности $\lg R'_{HK}(T_{\rm eff})$, который для Кеплер-1627 составил величину -4.17. Согласно Лоренцо-Оливейро и др. (2018), в их выборке звезды моложе 1 млрд лет имеют среднее значение индекса активности $\lg R'_{HK}(T_{\rm eff}) = -4.54 \pm 0.09$, которое соответствует по предложенной калибровке возрасту в 0.6 ± 0.2 млрд лет. Очевидно, что изучаемый нами объект имеет большую величину индекса активности, чем самые молодые звезды из Лоренцо-Оливейро и др. (2018), что несомненно свидетельствует о его молодости. К сожалению, по оценке Лоренцо-Оливейро и др. (2018) применимость соотношения, связывающего индекс активности $\lg R'_{HK}(T_{\rm eff})$ с возрастом объектов, ограничивается интервалом возрастов 0.5–9 млрд лет и не подходит к более молодым звездам. В принципе, располагая аналогичными оценками для других объектов, помимо Кеплер-1627, можно будет построить уточненную зависимость, а в настоящее время можно лишь с уверенностью заключить, что по свойствам своей хромосферной активности Кеплер-1627 является молодой звездой с возрастом десятки-сотни миллионов лет.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе высокоточного материала из архива космического телескопа Кеплер проведено исследование фотометрической переменности молодого солнечного аналога Кеплер-1627 — звезды спектрального класса G8V с планетой размером 3.777 радиусов Земли и периодом обращения $\sim$7.2 сут. Кеплер-1627 является членом скопления δ Lyr с возрастом 38 млн лет и в настоящее время — системой с самой молодой планетой с точным возрастом, обнаруженной основной миссией Кеплер. По всем доступным наблюдениям мы нашли величины периода вращения звезды $P = 2.606 \pm 0.020$ сут, параметра дифференциального вращения звезды $\Delta\Omega = 0.066 \pm 0.011$ рад/сут и амплитуды переменности блеска, а также по стандартной методике оценили относительные и абсолютные величины параметра запятненности Кеплер-1627.

Возможно, что площадь пятен на поверхности звезды обладала циклическими изменениями, аналогом которых может быть на Солнце так называемая периодичность Ригера. У звезды обнаружены высокая вспышечная и пятенная активность. Рассмотрены возможные проявления цикличности во вспышечной активности Кеплер-1627. Установлено, что изучаемый нами объект имеет большую величину индекса хромосферной активности $\lg R'_{HK}(T_{\rm eff})$, чем самые молодые звезды из Лоренцо-Оливейро и др. (2018), что также свидетельствует о его молодости.

Автор признателен правительству Российской Федерации и Министерству высшего образования и науки РФ за поддержку по гранту 075-15-2020-780 (N13.1902.21.0039).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Архипов, Ходаченко (O.V. Arkhypov and M.L. Khodachenko), Astron. Astrophys. **651**, A28 (2021).
2. Боума и др. (L.G. Bouma, J.L. Curtis, K. Masuda, L.A. Hillenbrand, G. Stefansson, H. Isaacson, et al.), arXiv e-prints, arXiv:2112.14776 (2021).
3. Гургенашвили и др. (E. Gurgenashvili, T.V. Zaqarashvili, V. Kukhianidze, R. Oliver, J.L. Ballester, M. Dikpati, and S.W. McIntosh), Astrophys. J. **845**, 137 (2017).
4. Гургенашвили и др. (E. Gurgenashvili, T.V. Zaqarashvili, V. Kukhianidze, et al.), arXiv e-prints, arXiv:2108.04006 (2021).
5. Дойл и др. (L. Doyle, G. Ramsay, and J.G. Doyle), MNRAS **494**, 3596 (2020).
6. Лоренцо-Оливейра и др. (D. Lorenzo-Oliveira, F.C. Freitas, J. Meléndez, M. Bedell, I. Ramírez, J.L. Bean, M. Asplund, L. Spina, S. Dreizler, A. Alves-Brito, and L. Casagrande), Astron. Astrophys. **619**, A73 (2018).

7. Масси и др. (M. Massi, J. Neidhöfer, Y. Carpentier, and E. Ros), Astron. Astrophys. **435**, L1 (2005).
8. Наговицин, Певцов (Y.A. Nagovitsyn and A.A. Pevtsov), Astrophys. J. **906**, 27 (2021).
9. Окамото и др. (S. Okamoto, Y. Notsu, H. Maehara, K. Namekata, S. Honda, K. Ikuta, D. Nogami, and K. Shibatai), Astrophys. J. **906**, 72 (2021).
10. Рейнхольд, Гизо (T. Reinhold and L. Gizon), Astron. Astrophys. **583**, A65 (2015).
11. Ригер и др. (E. Rieger, G.H. Share, D.J. Forrest, G. Kanbach, C. Reppin, and E.L. Chupp), Nature **312**, 623 (1984).
12. Саванов (I.S. Savanov), Astron. Rep. **62**, 814 (2018).
13. Саванов И.С., Письма в Астрон. журн. **47**, 206 (2021) [I.S. Savanov, Astron, Lett, **47**, 175 (2021)].
14. Ту и др. (Z.-L. Tu, M. Yang, Z.J. Zhang, and F.Y. Wang), Astrophys. J. **890**, 46 (2020).
15. Янг, Лиу (H. Yang and J. Liu), Astrophys. J. Suppl. Ser. **241**, 29 (2019).