

DOI: 10.54503/0571-7132-2023.66.3-373

АКТИВНОСТЬ МОЛОДОЙ ЗВЕЗДЫ EPIC 204376071 ИЗ АССОЦИАЦИИ UPPER SCO

И.С.САВАНОВ

Поступила 19 апреля 2023

Принята к печати 18 августа 2023

По наблюдениям миссии K2 космического телескопа Кеплер выполнено исследование активности EPIC 204376071-молодого объекта, члена ассоциации Upper Sco с возрастом 11 ± 3 млн лет, кривая блеска которого обладает единичным затмением суточной продолжительности с глубиной около 80%. EPIC 204376071 является маломассивным M-карликом с массой $0.16 M_{\odot}$. По наблюдениям кампании C15 миссии K2 мы уточнили период вращения и амплитуду переменности блеска звезды, а также по стандартной методике оценили величину параметра запятненности A в абсолютной мере. Величина периода вращения звезды P равна 1.6270 ± 0.030 сут. Площадь пятен на поверхности EPIC 204376071 превосходит максимальную площадь пятен на Солнце и составляет величину порядка 7900 м.д.п. Представлены результаты восстановления температурных неоднородностей на поверхности EPIC 204376071. На построенной карте хорошо различимы две холодные области, разделенные по долготе примерно на 150° . Для оценки свойств вспышечной активности EPIC 204376071 была рассмотрена одна наиболее достоверная вспышка с амплитудой блеска около 4%. Измеренная относительная энергия вспышки RE составила 212 с. Вычисленная энергия вспышки E_{fl} оказалась равной $1.1 \cdot 10^{34}$ эрг ($\log E_{\text{fl}} = 34.05$). Соответствующая ей вероятная величина массы коронального выброса может достигать $4.1 \cdot 10^{20}$ г. Рассмотрены литературные сведения о возможной природе единичного затмения суточной продолжительности с глубиной около 80% на кривой блеска EPIC 204376071.

Ключевые слова: *звезды: активность: пятна: фотометрия: переменность: вспышки: затмения*

1. *Введение.* В настоящее время, благодаря высокоточным квази-непрерывным фотометрическим наблюдениям с космическими телескопами, у широкого круга звезд стало возможным проведение исследований явления ослабления блеска (затмений), вызванных пылевой материей. К их числу, например, можно отнести объекты, получившие название дипперов (dippers) (см. [1] и ссылки в этой статье). Их затмения могут носить периодический, квазипериодический или даже непериодический характер. Длительность затмений может составлять несколько часов, а глубина доходить до 10-50%. Причиной затмений служит пылевое вещество, находящееся, например, у внутреннего края околос звездного диска или связанное с магнитосферой звезды. Как правило, большинство дипперов являются звездами спектрального класса M, для них характерно наличие избытка ИК излучения, многие из них принадлежат молодым ассоциациям Upper Scorpius и ρ Ophiuchus.

Уникальным объектом, на кривой блеска которого имеются свидетельства затмений, вызванных пылью, является объект KIC 8462852 (известный как звезда Бояджяна). В литературе имеются результаты многочисленных исследований (см., например ссылки в [2]), содержащих подробное обсуждение свойств объекта, периодичности затмений и проч. Основное отличие KIC 8462852 от дипперов состоит в том, что этот объект является звездой главной последовательности (ГП) спектрального класса F.

К числу других объектов (их список достаточно многочислен) с пылевыми затмениями можно отнести молодые звезды типа Т Тельца, объекты с возможными экзокометами (KIC 3542116, KIC 11084727 и др.), звезды с различной глубиной транзитов экзопланет, возможно имеющих пылевое окружение, уникальный белый карлик WD 1145+017 с затмениями глубиной около 1%, еще один уникальный объект 1SWASP J140747.93-394542.6 с затмением глубиной в 3^m и длительностью 45 сут и многие другие. Более подробные сведения об этих и других аналогичных объектах можно найти в [2] и в других статьях авторов.

В частности авторами [2] было обнаружено единичное затмение суточной продолжительности с глубиной около 80% у звезды EPIC 204376071 - молодого объекта - члена ассоциации Upper Sco. Цель нашего исследования заключается в изучении проявлений активности этой звезды.

2. EPIC 204376071 - молодая звезда - член ассоциации Upper Sco. В [2] опубликованы результаты анализа фотометрических наблюдений миссии Кеплер (K2) звезды EPIC 204376071 ($V=16^m.3$), принадлежащей ассоциации Upper Sco с возрастом 11 ± 3 млн лет, одной из самых молодых звездных ассоциаций. Молодость звезды подтверждается в [1,2] по ее кинематическим, спектральным и фотометрическим характеристикам, таким как быстрое вращение и значительная фотометрическая модуляция. Наблюдения объекта выполнялись миссией K2 в течение кампаний 2 (C2) и 15 (C15). В данных C15 авторы [2] обнаружили единичное событие значительного ослабления блеска EPIC 204376071 для даты 3168.5 BKJD (в шкале наблюдений миссии K2 BJD - 2454833) глубиной порядка 80% и продолжительностью около суток (рис.1a, c).

С учетом отсутствия аналогичного ослабления блеска в ходе кампании C2 и интервала времени между кампаниями C2 и C15 авторы [2] сделали заключение о величинах возможных интервалов периодов ослаблений блеска. Форма наблюдаемого явления асимметрична, по длительности вход в ослабление происходил примерно в два раза быстрее, чем выход из него. В остальном изменения блеска характеризуются вращательной модуляцией с амплитудой около 1% и периодом около 1.6 сут (см. также [1]).

Согласно [2] масса звезды составляет $M=0.161 \pm 0.028$ массы Солнца. Объект отождествлен с источником Gaia EDR3 6243166527355588608, его параллакс составляет π (mas) = 7.1711 ± 0.0577 . На основе анализа кинематических свойств подтверждено, что EPIC 204376071 принадлежит ассоциации Upper Sco [2].

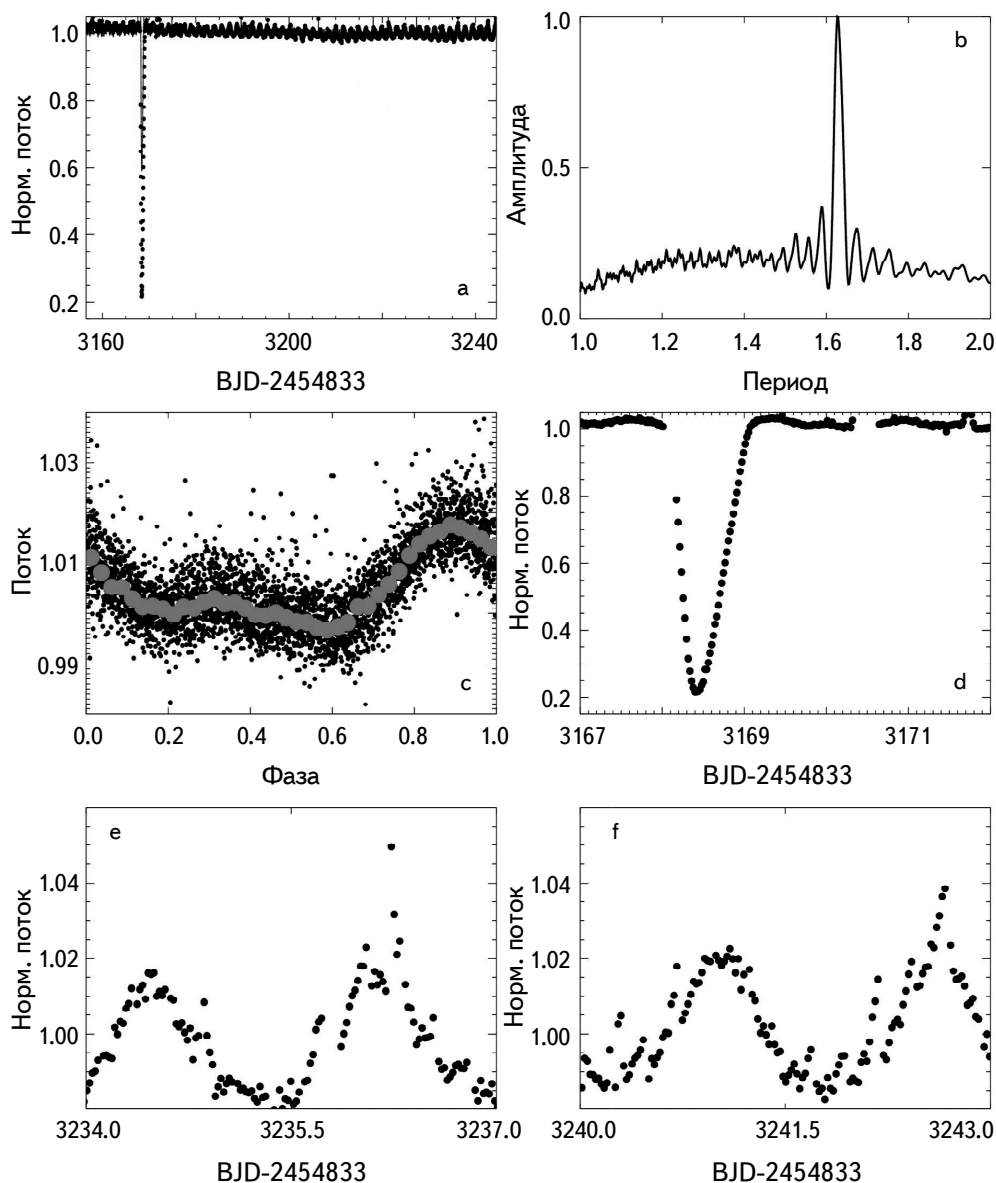


Рис.1. Кривая блеска для EPIC 204376071 (a), спектр мощности переменности блеска (b), фазовая диаграмма переменности блеска (светлые кружки соответствуют усредненным по бинам величинам) (c), суточное ослабление блеска (d), фрагменты кривой блеска (e,f). Данные приведены для наблюдений в кампании S15.

Эффективная температура звезды равна 2960 ± 75 К. Данные каталога Gaia EDR3 содержат более высокое значение оценки $T_{\text{эфф}} = 3861 \pm 450$ К. Отметим, что перечисленные нами свойства EPIC 204376071 приводятся согласно данным, указанным в [2] (табл.3) и в астрономической базе данных Simbad.

Как отмечалось выше, для EPIC 204376071 в архиве миссии Кеплер имеются данные 2-х кампаний наблюдений. Наша обработка была аналогична проводимой нами ранее для других объектов из архива космического телескопа Кеплер и подобна описанной в [3]. Наибольшее внимание мы уделили данным кампании C15, содержащим ослабление блеска и менее зашумленным, по сравнению с измерениями кампании C2. На рис.1a, b, c представлены: кривая блеска EPIC 204376071, соответствующий спектр мощности и фазовая диаграмма. Хорошо заметна периодическая модуляция блеска, обладающая заметной переменностью амплитуды. В течение сета наблюдений звезда не меняла свою активность. На шкале времени порядка длительности наблюдений в сете C15 форма фазовой кривой и положения максимумов и минимумов не претерпели изменений (рис.1c), что, вероятно, свидетельствует о сравнительно устойчивом положении холодных областей на поверхности звезды. Такая стабильная конфигурация пятен достаточно характерна для маломассивных, полностью конвективных звезд. EPIC 204376071 является маломассивным М-карликом ($0.16 M_{\odot}$) с радиусом $0.63 R_{\odot}$. Большой радиус по сравнению с характерным радиусом для звезды ГП с аналогичной массой, по мнению и оценкам [2], указывает на то, что вероятно звезда еще не достигла ГП. Примером может служить М4 карлик V374 Peg с массой $0.3 M_{\odot}$ и периодом 0.5 сут, для которого кривая блеска обладает малыми изменениями и остается практически стабильной на протяжении почти 16-и лет ([4]).

На построенных нами спектрах мощности имеется характерный пик, соответствующий величине периода вращения звезды $P = 1.627 \pm 0.030$ сут (погрешность оценена по полуширине пика). Авторами [1] была приведена совпадающая с полученной нами величина периода вращения EPIC 204376071 – 1.6268 сут.

Рассчитанные спектры мощности и вид фазовой кривой указывают на достаточно стабильный характер изменений блеска изучаемой звезды. Амплитуда переменности блеска составляет около 2% от уровня среднего блеска звезды. По стандартной методике (см. в [3]) нами были оценены величины параметра запятненности EPIC 204376071, которые достигают 5.5% от площади ее поверхности. Принимая оценку радиуса звезды $R = 0.631 \pm 0.042$ радиусов Солнца из [2], можно получить величину площади поверхности запятненности в абсолютной мере (в миллионных долях видимой полусферы Солнца, м.д.п.). На Солнце средние по размерам пятна имеют площадь

10-200 м.д.п. (детали см. в [5]). Площадь пятен на поверхности EPIC 204376071 превосходит максимальную площадь пятен на Солнце и составляет величину порядка 7900 м.д.п.

3. *Температурные карты поверхности EPIC 204376071.* Дальнейший анализ фотометрической переменности звезды был выполнен нами с фотометрическим периодом $P = 1.6270$ сут. Данные на фазовой кривой были разделены на 40 бинов, для каждого из которых были найдены средние величины. В каждом бине содержалось порядка 90-100 оценок блеска звезды.

Как и в наших предыдущих исследованиях карликов поздних спектральных классов, мы выполнили анализ кривой блеска с помощью программы iPH [6]. Программа решает обратную задачу восстановления температурных неоднородностей на поверхности звезды по кривой блеска в двухтемпературном приближении (интенсивность излучения от каждой элементарной площадки на поверхности звезды складывается из двух компонентов: фотосферы и холодного пятна). Полное описание программы, ее тесты представлены в [6]. Как указывалось выше, мы приняли температуру звезды равной 2960 К [2].

Авторами [7] методом доплеровского картирования были изучены пятна на поверхности двух холодных, полностью конвективных, М-карликов. Один из них, М4.5-карлик GJ791.2A, имеет температуру фотосферы $T_{\text{эфф}} = 3000$ К, сопоставимую с величиной для EPIC 204376071. По построенным доплеровским картам в [7] было получено, что температура пятен ниже температуры фотосферы на 300 К. Таким образом, в наших расчетах мы также приняли, что $T_{\text{spot}} = 2700$ К.

Согласно нашей методике, для каждой элементарной площадки размером $6^\circ \times 6^\circ$ на поверхности звезды был определен фактор заполнения f - доля поверхности элементарной площадки, занимаемой пятнами. На рис.2 представлены результаты восстановления температурных неоднородностей на поверхности EPIC 204376071. На рисунке приведены также наблюдаемая (усредненная

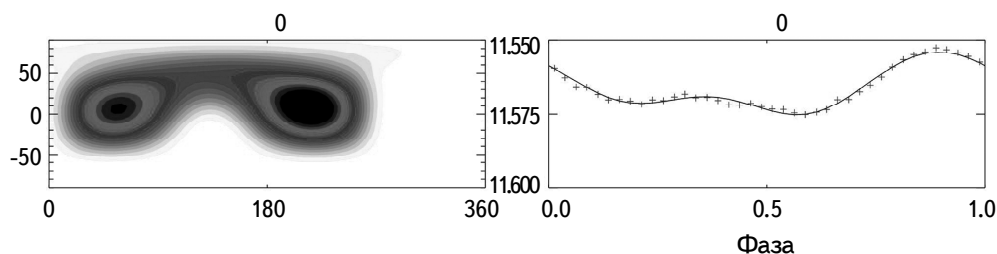


Рис.2. Результаты восстановления температурных неоднородностей на поверхности EPIC 204376071. Карты поверхности представлены в единой шкале, более темные области на рисунках соответствуют более высоким значениям факторов заполнения f . На этом же рисунке также приводятся наблюдаемая кривая блеска и теоретическая кривая блеска, построенные по восстановленной модели.

по бинам) и теоретическая (построенная по восстановленной модели) кривые блеска. Если на поверхностных картах имелись концентрации пятен на двух долготах, то их значения регистрировались нами, как две независимые активные долготы. Погрешность определений положений активных долгот составляет величину порядка около 0.06-0.08 в единицах фазы. Как отмечалось выше, кривая блеска EPIC 204376071 характеризуется наличием двух минимумов. В соответствии с этим, на построенной карте хорошо различимы две холодные области, разделенные по долготе примерно на 150° .

Как и в [2] величина угла i наклона оси вращения звезды к лучу зрения была принята равной 60° . Оказалось, в случае изменения величины параметра на 20° различия в картах не изменяют сделанных нами заключений о положении активных областей на поверхности звезды. Согласно нашим вычислениям (см. в [6] многочисленные тесты), построенные карты содержат преимущественно информацию о положении пятен по долготе, но не по широте. Заключения о наличии полярных пятен (как в [7] для GJ791.2A) мы сделать не можем.

4. Вспышечная активность. По мнению авторов [2] (рис.5 в их статье) на кривой блеска EPIC 204376071 присутствует ряд вспышек с амплитудой до 6%. Следует иметь в виду, что качество наблюдательного материала, полученного с продолжением миссии Кеплер K2, существенно ниже, чем для данных основной миссии. Нестабильное поведение космического телескопа приводит к появлению многочисленных артефактов на регистрируемых кривых блеска, которые, к сожалению, до конца не устраняются при редукции данных. В принципе, по форме многие артефакты существенно отличаются от характерной формы большинства вспышек (фаза возгорания, более плавная фаза затухания), но требуется осторожность при отборе явлений, похожих на вспышки.

На рис.1 приводятся два фрагмента кривой с артефактами, как вызванных возможно недостаточно точной редукцией данных, так и проявлением вероятных вспышек со структурой, характерной для вспышек звезд позднего спектрального класса - резкий подъем, пик, стадия затухания. В нашем исследовании мы ограничились рассмотрением одной наиболее достоверной вспышки, которая, несомненно, может дать представление о свойствах вспышечной активности EPIC 204376071. Амплитуда блеска вспышки составляет около 4%. Энергия излучения вспышки была вычислена нами по стандартной методике, принятой при анализе вспышечной активности звезд по наблюдениям с космическим телескопом Кеплер или миссией TESS (см. в [8,9]). Данная методика уже неоднократно использовалась для определений энергетики вспышек звезд по наблюдениям миссии TESS с учетом изменения полосы пропускания для

этой космической миссии - см., например, описание в [10]. Как и в [10], нами принималось, что вспышка характеризуется чернотельным излучением. Измеренная относительная энергия вспышки RE составила 212с. Вычисленная по формулам из [10] энергия вспышки E_{fl} оказалась равной - $1.1 \cdot 10^{34}$ эрг ($\log E_{fl} = 34.05$).

Результаты широкого круга исследований, включающих анализ свойств звездных вспышек, основанных на данных наблюдений с космическим телескопом TESS с июля 2018г. по октябрь 2020г., можно найти в [11]. Авторами [11] были проанализированы 60810 вспышек для 13478 звезд по наблюдениям TESS в секторах 1-30. В исследовании были рассмотрены объекты в диапазоне $T_{эфф}$ от 2500 К до 6500 К и с массами от 0.08 до 1.4 масс Солнца. Для сравнения с EPIC 204376071 укажем, что по данным [11] (рис.12) значения энергии вспышек для звезд с температурой около 3000 К лежат в диапазоне от $7 \cdot 10^{31}$ до $5 \cdot 10^{34}$ эрг. Найденная нами энергия вспышки для EPIC 204376071 выше средней, но в целом сопоставима с типичными максимальными величинами E_{fl} для М звезд с $T_{эфф} = 3000$ К.

Следуя идее солнечно-звездной аналогии и на других звездах можно ожидать корональные выбросы массы СМЕ [10,12], которые могут проявляться в сопутствующих возмущениях плотности и скорости плазмы, ускорении энергичных частиц в областях ударов. Все эти факторы принимаются во внимание при изучении влияния СМЕ на экзопланеты и их атмосферы, но не исключена вероятность необходимости учета их влияния на малые тела экзопланетных систем (экзокометы и проч.) при условии совпадения направления СМЕ на объект. Планетарное влияние звездной активности СМЕ может варьироваться в зависимости от возраста звезды, ее активности, спектрального типа и орбитального расстояния планеты. Для оценки свойств СМЕ часто используется эмпирическая зависимость, связывающая энергию вспышки и массу СМЕ (см. подробнее в [10,12]). Применение зависимости к данным для EPIC 204376071 приводит к оценке, что для этой звезды вероятная величина массы СМЕ может достигать $4.1 \cdot 10^{20}$ г.

Для того, чтобы оценить величины максимально возможных масс СМЕ для самых холодных карликов, в [12] мы использовали данные [13] об энергиях супервспышек восьми карликов спектрального класса М. Энергии супервспышек этих объектов лежат в диапазоне величин $\log E_{fl}$ от 33.59 до 34.96. Возможно, что по энергии вспышка на EPIC 204376071 подобна супервспышкам объектов из [13]. Требуются дальнейшие наблюдения для подтверждения характеристик вспышечной активности EPIC 204376071. Масса соответствующих СМЕ у карликов из [13] в случае супервспышек может достигать до $2.2 \cdot 10^{20}$ - $1.5 \cdot 10^{20}$ г, что не только сопоставимо, но даже немного превосходит массы СМЕ звезд солнечного типа, установленные по средним

энергиям вспышек.

5. *Заключение и обсуждение результатов.* Авторы [2] сообщили об обнаружении значительного (на 80%) ослабления блеска молодой звезды EPIC 204376071 длительностью порядка суток. В остальном, кривая блеска объекта в течение интервала наблюдений с космическим телескопом Кеплер (миссия K2) длительностью в общей сложности около 160 сут во время кампаний C2 и C15 характеризуется изменениями вследствие вращательной модуляции, а также возможным наличием вспышек. EPIC 204376071 является маломассивным М-карликом ($0.16 M_{\odot}$) с радиусом $0.63 R_{\odot}$. Молодость звезды определяется ее принадлежностью к ассоциации Upper Scorpius с возрастом порядка 10 млн лет. Большой радиус по сравнению с характерным радиусом для звезды ГП с аналогичной массой указывает на то, что, вероятно, звезда еще сжимается и не достигла ГП. Период вращения $P = 1.6$ сут также соответствует предположению о молодости звезды.

По наблюдениям миссии K2 мы уточнили период вращения и амплитуду переменности блеска EPIC 204376071, а также по стандартной методике оценили величину параметра запятненности A в абсолютной мере. Из решения обратной задачи восстановления температурных неоднородностей звезды по усредненной кривой блеска получена карта поверхностных температурных неоднородностей. Для оценки свойств вспышечной активности EPIC 204376071 была рассмотрена одна наиболее достоверная вспышка. Амплитуда блеска вспышки составляет около 4%. Измеренная относительная энергия вспышки RE составила 212с. Вычисленная энергия вспышки E_{fl} оказалась равной $1.1 \cdot 10^{34}$ эрг ($\log E_{fl} = 34.05$). По эмпирической зависимости, связывающей энергию вспышки и массу СМЕ, установлено, что для этой звезды вероятная величина массы СМЕ может достигать $4.1 \cdot 10^{20}$ г.

В [2] были исследованы два основных сценария проявления глубокого асимметричного затемнения, подобного наблюдаемому в EPIC 204376071. В первом из них был рассмотрен пылевой диск около малого тела, вращающегося вокруг звезды. Диск наклонен к наблюдателю так, что в проекции он выглядит как эллипс. Параметры модели представлены в табл.4 в [2]. Возможные величины полуосей диска составляют 4.2 и 0.89 радиусов звезды, а наклон диска равен 22° . Масса диска равна $3 \cdot 10^{19}$ г, а масса малого тела, к которому принадлежит диск - 3 массы Юпитера. Во втором сценарии предлагался пылевой экран "неизвестного происхождения", возможно временного характера. В этой модели прозрачность экрана систематически уменьшается от резкой границы до противоположного края (см. рис.8 в [2]). По мнению авторов [2] обе модели достаточно хорошо описывают форму затмения (может быть, модель с диском несколько лучше). Возможность

существования кометного хвоста от малого тела в [2] была рассмотрена, но отвергнута по их мнению вследствие малого потока излучения (по сравнению с требуемым для формирования хвоста) от звезды со светимостью в $0.027 L_{\odot}$. Однако, принимая во внимание наличие высокой вспышечной активности звезды и сопутствующих СМЕ, не исключена необходимость дополнительного изучения этого вопроса (при условии подтверждения существования супервспышек, генерации СМЕ в требуемом направлении и проч.).

Поскольку EPIC 204376071 является членом ассоциации Upper Scorpius, для которой характерно большое число объектов, известных как дипперы, естественным является вопрос о том, не связано ли наблюдаемое явление ослабления блеска с проявлением природы диппера. В таком случае ослабление будет вызвано пылевой материей, находящейся вблизи радиуса коротации около звезды, однако в [2] были рассмотрены три возможных отличия EPIC 204376071 от остальных объектов - дипперов (см. подробности и соответствующие ссылки на литературу здесь и далее в [2]). Во-первых, для дипперов глубина ослабления блеска составляет всего 10-30%, возможным исключением является звезда HQ Тау, для которой глубина была сопоставима или превосходила величину для EPIC 204376071, а продолжительность затмения была более длительной. Во-вторых, активность дипперов, как правило, остается высокой в течение всего интервала наблюдений (десятки дней) и у них ослабления блеска наблюдаются гораздо чаще; правда, вопрос о возможности селекции наблюдений по частоте наблюдений до конца не решен. Наконец, в-третьих, большинство дипперов имеют ярко-выраженный избыток потока излучения в полосах WISE 3 и 4, тогда как EPIC 204376071 характеризуется слабой эмиссией в полосе WISE 3, а в полосе WISE 4 для объекта имеется лишь верхняя оценка потока.

Исследование EPIC 204376071 представляет интерес с точки зрения установления природы затмения блеска этого объекта. Остается открытым вопрос о характере затмевающего тела - это тело с эллипсообразной пылевой оболочкой, пылевой экран, экзокомета (если возможно образование ее хвоста вследствие супервспышек на звезде) или что-то еще? Необходимы новые наблюдения этого объекта, а также поиск звезд с аналогичными затмениями.

Исследование выполнено в рамках проекта "Исследование звезд с экзопланетами" по гранту Правительства РФ для проведения научных исследований, проводимых под руководством ведущих ученых (соглашение № 075-15-2019-1875, 075-15-2022-1109).).

ACTIVITY OF THE YOUNG STAR EPIC 204376071 FROM THE UPPER SCO ASSOCIATION

I.S.SAVANOV

Using the observations of the K2 mission of the Kepler Space Telescope we studied the activity of EPIC 204376071 - a young object in the Upper Sco association with the age of 11 ± 3 million years, whose light curve has a single occultation of daily duration with a depth of about 80%. EPIC 204376071 is a M-dwarf of mass $0.16 M_{\odot}$. On the base on the observations of the C15 campaign of the K2 mission we estimated the rotation period, amplitude of the variability of the brightness of the star and the spottedness parameter A in absolute measure using the standard method. The magnitude of the rotation period of the star P is 1.6270 ± 0.030 days. The area of spots on the surface of EPIC 204376071 exceeds the maximum area of spots on the Sun and is about 7900 MSH. The results of the restoration of temperature inhomogeneities on the surface of EPIC 204376071 are presented. Two cool regions separated in longitude by about 150° are clearly distinguishable on the constructed map. Characteristics stellar flare activity are estimated on the base of one of the most reliable flare. The flare amplitude is about 4%. The measured relative energy RE of the flare was 212 sec. The calculated energy of the flare E_{fl} equal to $1.1 \cdot 10^{34}$ erg ($\log E_{\text{fl}} = 34.05$). The corresponding probable value of the coronal mass ejection can reach $4.1 \cdot 10^{20}$ g. Possible explanations of a single occultation of 1-day duration with a depth of about 80% on the EPIC 204376071 light curve are discussed.

Keywords: *stars: activity: spots: photometry: variability: variability: flares: occultation*

ЛИТЕРАТУРА

1. *L.M.Rebull, J.R.Stauffer, A.M.Cody et al.*, Astron. J., **155**, 196, 2018.
2. *S.Rappaport, G.Zhou, A.Vanderburg et al.*, Mon. Not. Roy. Astron. Soc., **485**, 2681, 2019.
3. *I.S.Savanov*, Astrophysics, **64**, 178, 2021.
4. *K.Vida, L.Kriskovics, K.Olah et al.*, Astron. Astrophys., **590**, A11, 2016.
5. *Y.A.Nagovitsyn, A.A.Pevtsov*, Astrophys. J., **906**, id. 27, 2021.
6. *I.S.Savanov, K.G.Strassmeier*, Astron. Nachr., **329**, 364, 2008.
7. *J.R.Barnes, S.V.Jeffers, H.R.A.Jones et al.*, Astrophys. J., **812**, 42, 2015.

8. *S.Okamoto, Y.Notsu, H.Maehara et al.*, *Astrophys. J.*, **906**, 72, 2021.
9. *Z.-L.Tu, M.Yang, H.-F.Wang et al.*, *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, **253**, 35 2021.
10. *M.N.Gunther, Z.Zhan, S.Seager*, *Astron. J.*, **159**, 60, 2020.
11. *Z.Yang, L.Zhang, G.Meng et al.*, *Astron. Astrophys.*, **669**, A15, 2023.
12. *I.S.Savanov*, *Astron. Lett.*, **46**, 831, 2020.
13. *H.-Y.Chang, C.-L.Lin, W.-H.Ip et al.*, *Astrophys. J.*, **867**, 78, 2018.