

ХОЛОДНЫЕ ПЯТНА НА ПОВЕРХНОСТИ АКТИВНОГО ГИГАНТА PZ Mop

© 2019 г. Ю. В. Пахомов^{1*}, В. И. Шенаврин², Н. И. Бондарь³,
К. А. Антонюк³, Н. В. Пить³, С. П. Белан³, С. Ю. Горда⁴

¹Институт астрономии РАН, Москва, Россия

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

³Крымская астрофизическая обсерватория РАН, Научный, Россия

⁴Коуровская астрономическая обсерватория Уральского федерального университета,
Екатеринбург, Россия

Поступила в редакцию 20.11.2018 г.; после доработки 23.11.2018 г.; принята к публикации 28.11.2018 г.

На основе впервые выполненных многоцветных фотометрических наблюдений (BVRIJHKL) активного красного гиганта PZ Mop в зимний сезон 2017–2018 гг. определены основные характеристики запятненной поверхности звезды в параметрической модели трех пятен. Температура незапятненной поверхности $T_{\text{eff}} = 4730$ К, температура холодных пятен $T_s = 3500$ К, их относительная площадь около 41%, температура теплых пятен около 4500 К с максимальной относительной площадью до 20%. Выполнено моделирование распределения пятен по поверхности звезды. Выявлено, что теплые пятна рассредоточены на различных долготях в полушарии со стороны второго компонента и, скорее всего, являются следствием его влияния.

Ключевые слова: переменные звезды.

DOI: 10.1134/S0320010819030057

ВВЕДЕНИЕ

Красный гигант PZ Mop (HD 289114, $V \approx 9.3$ mag, K2III) — переменная звезда (период 34.13 дня) типа RS CVn с выраженной активностью (Пахомов и др., 2015) и наличием синхронно вращающегося по круговой орбите мало-массивного компонента (Пахомов, Горыня, 2015). Активность звезд этого типа проявляется в переменности блеска, модулируемого с периодом их вращения, и обычно объясняется взаимодействием с гравитационным и магнитным полями и полем излучения спутника, влияющими на структуру атмосферы и магнитного поля главного компонента. В местах выхода линий магнитного поля подавляется конвективный перенос энергии, что приводит к некоторому охлаждению поверхности относительно спокойной фотосферы и появлению холодных температурных пятен. Амплитуда изменения блеска зависит от физических характеристик звезд двойной системы. Значительные перепады блеска, до 0.3^m , согласно каталогу (Экер и др., 2008), наблюдаются в случае близко расположенных звезд с отношением масс $q = M_2/M_1 >$

> 0.3 , а также в случае горячего спутника. Для исследования магнитного поля звезд применяют метод доплеровской томографии, для которого необходимы поляриметрические спектральные наблюдения, выполненные с высоким разрешением и с высоким отношением сигнала к шуму, что значительно ограничивает количество доступных объектов. Анализ фотометрических кривых блеска позволяет качественно изучать поверхность структуру и эволюцию холодных температурных пятен для большого количества объектов, в том числе и слабых. В системе PZ Mop отношение масс компонентов $q = 0.09$ — минимальное среди известных синхронных звезд типа RS CVn, в то время как амплитуда блеска составляет значимую величину до 0.10 – 0.15^m в фильтрах B и V . При этом активная область достаточно стабильна и постоянно расположена со стороны второго компонента (Пахомов, Горыня, 2015; Пахомов и др., 2017). Это определяет интерес к исследованию природы активности PZ Mop и степени влияния на нее второго компонента.

В период с октября 2017 г. по апрель 2018 г. впервые были проведены фотометрические наблюдения PZ Mop в широком спектральном диапазоне,

*Электронный адрес: pakhomov@inasan.ru

от оптического в фильтре B до инфракрасного в фильтре L . Целью данной работы является определение характеристик фотосферы активного гиганта PZ Моп на эпоху наблюдений путем анализа и моделирования кривых блеска. В разделе 1 мы описываем фотометрические наблюдения. В разделе 2 — анализ максимумов и амплитуд кривых блеска, оценка параметров холодных и теплых пятен. В разделе 3 — построение модели распределения пятен по поверхности звезды PZ Моп, которая описывает ее фотометрические характеристики. Далее представлены обсуждение результатов и заключение.

1. НАБЛЮДЕНИЯ

Фотометрические наблюдения PZ Моп были выполнены на трех инструментах в зимний сезон 2017–2018 г. С 26 декабря 2017 г. по 7 марта 2018 г. на 1.25-м телескопе АЗТ-11 Крымской астрофизической обсерватории с помощью пятиканального фотометра ProLine PL230, оснащенного ПЗС-матрицей $e2v$ CCD230-42, проведено семь наблюдений в трех фильтрах BVR_C , каждое из которых состояло из нескольких экспозиций. Приведение в стандартную фотометрическую систему Джонсона–Казинса выполнено на основе ранее определенных коэффициентов трансформации. Точность измерения звездных величин составила от 0.007^m до 0.010^m .

С 5 января по 3 апреля 2018 г. на 0.45-м телескопе АЗТ-3 Коуровской астрономической обсерватории Уральского федерального университета с помощью ПЗС-камеры FLI PL230 ($e2v$ CCD230-42-1-143, 2048×2048 , размер пикселя 15μ) выполнено 12 наблюдений в четырех фильтрах BVR_CI_C . Приведение в стандартную фотометрическую систему Джонсона–Казинса выполнено по звездам в кадре на основе данных каталога APASS (Хенден и др., 2015). Точность измерения звездных величин составила от 0.008^m до 0.015^m .

С 11 октября 2017 г. по 15 февраля 2018 г. на 1.25-м телескопе ЗТЭ Крымской астрономической станции ГАИШ МГУ с помощью инфракрасного фотометра на основе фотогальванического приемника InSb проведено девять наблюдений в четырех фильтрах $JHKL$. Точность измерения звездных величин составила от 0.02^m до 0.03^m .

Общее время наблюдений покрывает около пяти периодов осевого вращения PZ Моп, подавляющая часть которых приходится на два периода. По фотометрическим данным проекта ASAS-SN (Поймански, 1997)¹, в исследуемую эпоху не было изменений максимумов блеска и амплитуды. Хотя

точность измерений звездных величин ASAS относительно небольшая ($0.02–0.05^m$), такое стабильное поведение характерно для исследуемой звезды, поэтому возможно исследовать кривую блеска PZ Моп, свернутую с ранее найденным периодом. Эпоха для нулевой фазы принята JD2454807.2, что соответствует максимуму блеска. Многоцветные фотометрические наблюдения PZ Моп в таком большом диапазоне фильтров получены впервые. На рис. 1 и 2 показаны кривые блеска для оптического и инфракрасного диапазонов соответственно. Для наглядности масштаб по осям звездных величин сохранен одинаковым для всех кривых блеска.

2. ФОТОМЕТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ PZ Моп

На рис. 1 и 2, выполненных в одном масштабе, видны одинаковое поведение кривых блеска и постепенное уменьшение амплитуды с увеличением эффективной длины волны фильтра. Наибольшее значение амплитуды (рис. 3) характерно для коротковолновых фильтров B и V , а для инфракрасных фильтров амплитуды сопоставимы или меньше ошибок наблюдений; и ИК-блеск почти не показывает переменности.

Холодное пятно

Показатели цвета, определенные по наблюдениям в фильтрах $BVRIJHKL$, зависят от эффективной температуры звезды и используются для ее оценки. На рис. 4 показаны значения эффективной температуры PZ Моп, определенные по различным показателям цвета на основе синтетических спектров (Бесселл и др., 1998). T_{eff} для показателя $B - V$ близко к значению, полученному из анализа спектральных линий в оптическом диапазоне (Пахомов и др., 2015), тогда как для других показателей цвета наблюдается другая картина: с увеличением эффективной длины волны фильтра значение T_{eff} уменьшается. Значения самого показателя цвета $B - V$ расположены в среднем в интервале от 1.16^m до 1.18^m , что наблюдается уже в течение длительного времени даже при немалых перепадах величины блеска V от 9.0^m до 9.5^m .

Эти наблюдательные факты можно интерпретировать наличием значительной по площади холодной области в фотосфере звезды (Пахомов и др., 2018). Действительно, поверхность, значительно холоднее спокойной фотосферы, в видимом диапазоне излучает гораздо меньше энергии, например в фильтре B : $F(4730K)/F(3500K) \approx 20$, поэтому ее присутствие не обнаруживается по анализу коротковолновой части оптического диапазона. В длинноволновой части спектра холодная область гораздо заметнее (в фильтре K : $F(4730K)/F(3500K) \approx 1.5$), вследствие чего температура, определенная

¹<https://asas-sn.osu.edu/variables>

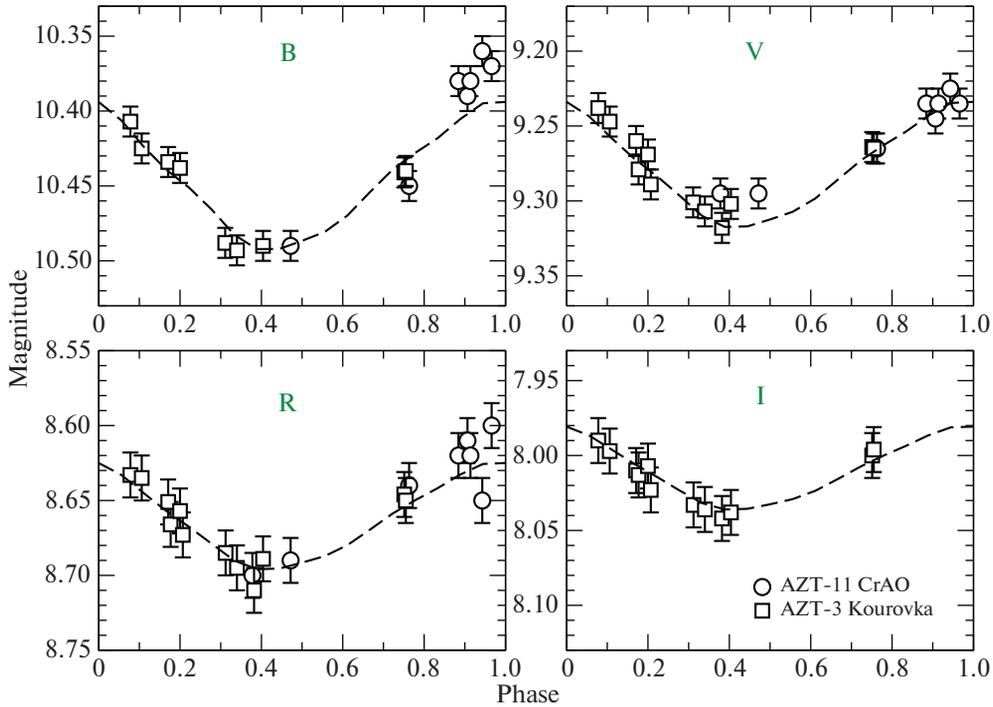


Рис. 1. Кривые блеска PZ Моп в фильтрах BVR_{CI} : квадраты — данные, полученные в Коуровской астрономической обсерватории, кружки — в Крымской астрофизической обсерватории; штриховые кривые — вычисленные кривые блеска. Масштаб по осям звездных величин одинаков.

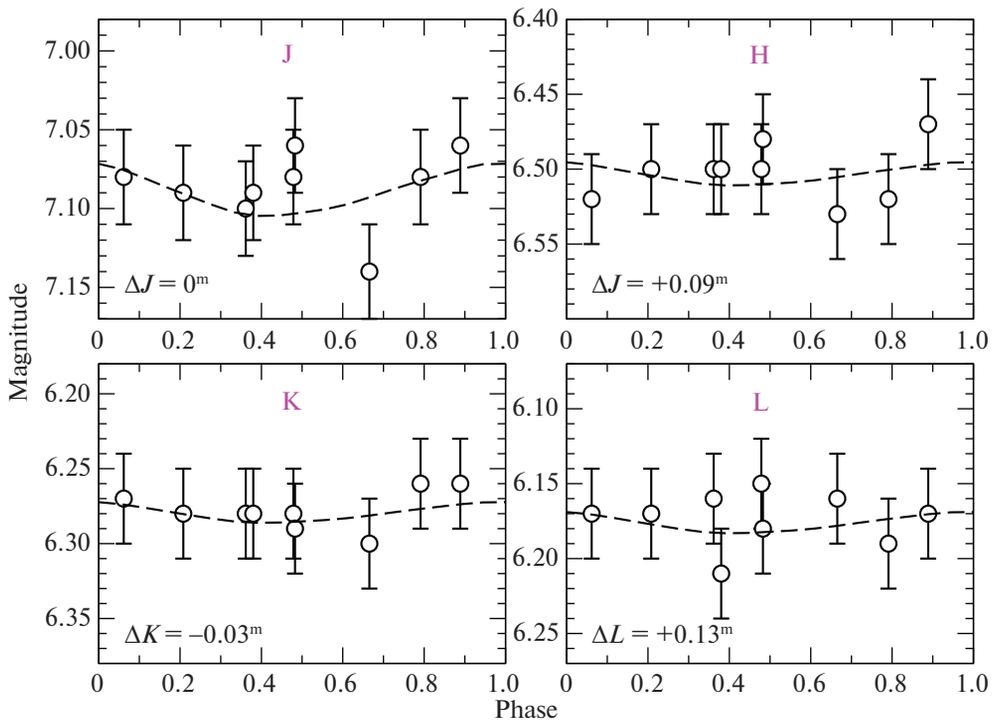


Рис. 2. Кривые блеска PZ Моп в фильтрах JHK_L . Штриховые кривые — кривые блеска, вычисленные со сдвигом, величина которого представлена в нижнем левом углу каждого графика. Масштаб по осям звездных величин такой же, как на рис. 1.

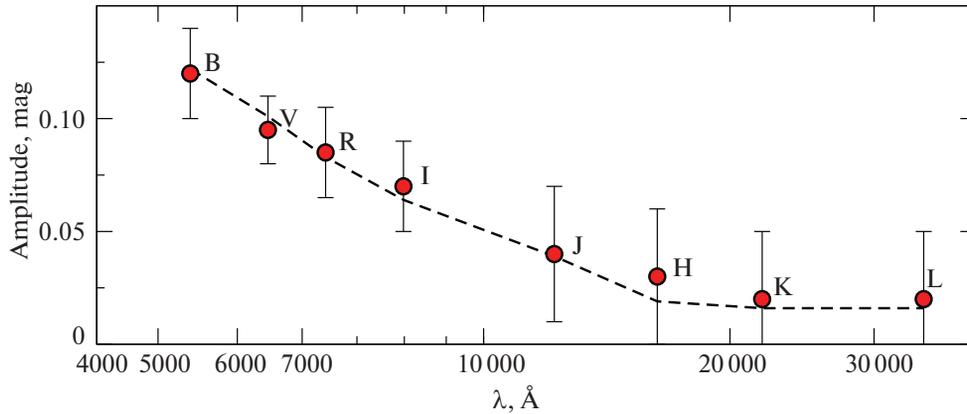


Рис. 3. Зависимость наблюдаемых амплитуд блеска (кружки) от эффективной длины волны фильтров. Штриховая кривая — рассчитанные значения амплитуды, наиболее хорошо описывающие наблюдения.

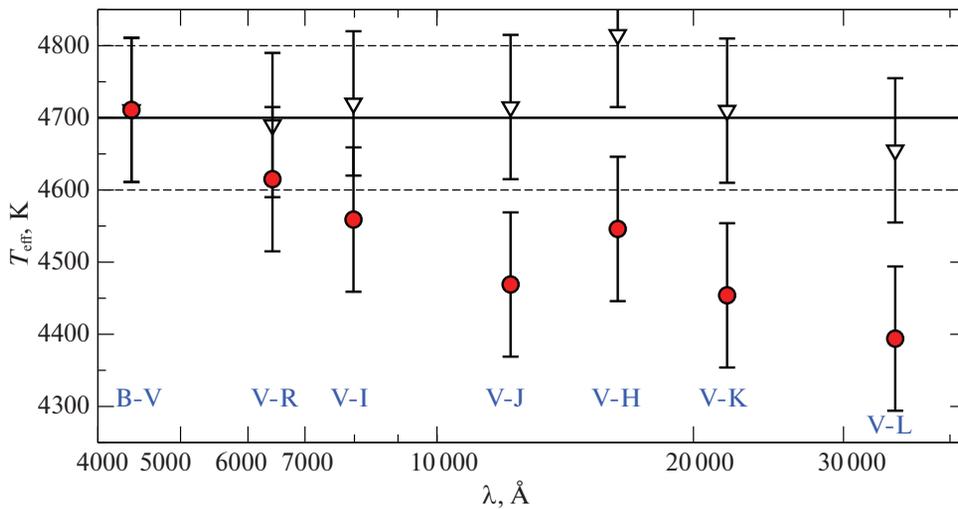


Рис. 4. Эффективные температуры PZ Моп, определенные по наблюдаемым показателям цвета в максимуме блеска (кружки), а также по восстановленным показателям цвета (треугольники). Прямая линия — значение $T_{\text{эф}}$, оцененное из спектральных наблюдений, с ошибкой, обозначенной пунктиром.

из повышенных ИК-показателей цвета, будет значительно занижена. На рис. 5 показаны избытки показателей цвета в максимуме блеска PZ Моп относительно нормальной незапятнанной звезды с такими же параметрами ($T_{\text{эф}} = 4730$ К, $\log g = 2.8$, $[\text{Fe}/\text{H}] = 0.07$, $E(B - V) = 0.06$ mag). Приведены как наблюдаемые значения, так и расчетные при наличии пятна с $T_s = 3500$ К и $T_s = 4000$ К и площадью S от 0% до 50%. Расчеты проведены с использованием интерполяции сетки звездных величин $m_X(T_{\text{эф}}, \log g, [\text{Fe}/\text{H}])$ в соответствующих фильтрах X из работы (Бесселл и др., 1998)². Звездные величины запятнанной звезды вычислены с частичным учетом эффекта потемнения к краю (сами величины m_X из сетки моделей учитывают этот эффект, но в данный момент не рассматри-

вается распределение пятен по поверхности) из соотношения

$$m_X = -2.5 \lg [10^{-0.4m_X^s} S + 10^{-0.4m_X} (1 - S)] - 5 \lg \frac{\theta}{2} + E(B - V) R_X, \quad (1)$$

где m_X^s — звездная величина 1 см² холодной поверхности звезды при $T_s = 3500$ К, m_X — звездная величина 1 см² незапятнанной поверхности звезды при $T_{\text{эф}} = 4730$ К, $\theta = 0.29$ mas — угловой диаметр PZ Моп, $R_X = A_X/E(B - V)$ — отношение поглощения в фильтре к избытку цвета ($B - V$). Приняты значения $E(B - V) = 0.06$ mag, $R_X = 4.08, 3.10, 2.58, 1.85, 0.88, 0.56, 0.34, 0.28$ для фильтров $BVRIJHKL$ соответственно.

²<http://wwwuser.oats.inaf.it/castelli/grids.html>

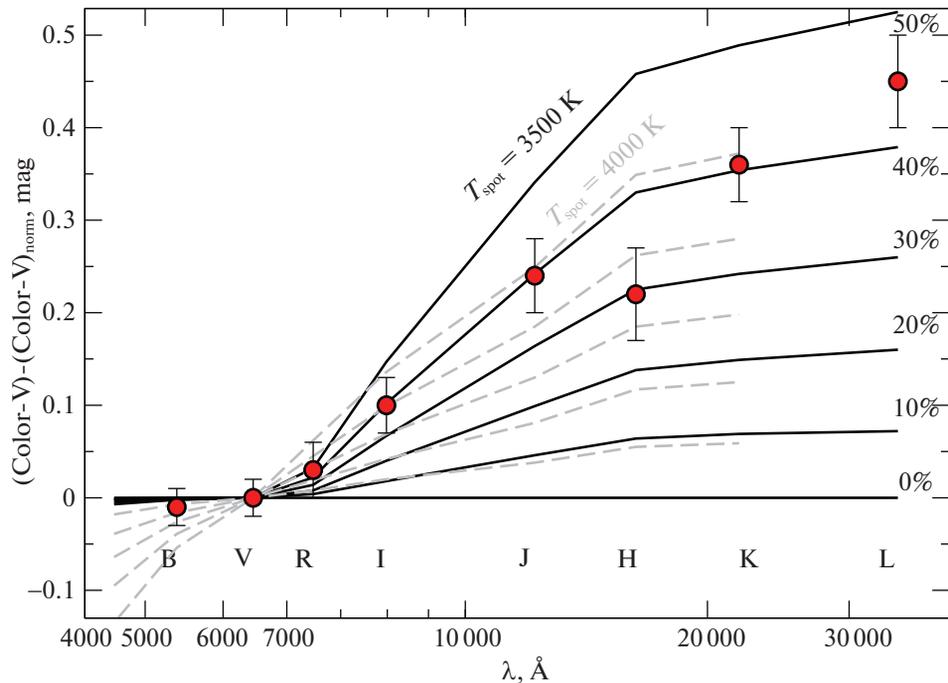


Рис. 5. Избытки показателей цвета PZ Моп относительно нормальной звезды с параметрами $T_{\text{eff}}/\log g/[\text{Fe}/\text{H}]/E(B - V) = 4730/2.8/0.07/0.06$: кружки — наблюдаемые величины для эпохи наблюдений PZ Моп, сплошные линии — теоретические значения, вычисленные для звезды с температурой пятен $T_s = 3500$ К и относительной площадью S от 0 до 50%, штриховые линии — теоретические значения, вычисленные для звезды с температурой пятен $T_s = 4000$ К.

В работе Пахомова и др. (2018) оценена температура холодного пятна $T_s = 3500$ К на основе анализа молекулярной полосы TiO. На рис. 5 также видно, что при более высокой температуре $T_s = 4000$ К ожидается значительный избыток цвета $B - V$, но этого не наблюдается. Избытки цвета сходятся с расчетными значениями при площади холодной области $41 \pm 2\%$ видимой поверхности звезды. Эти значения можно использовать совместно с наблюдаемыми и восстановить показатели цвета и температуру незапятнанной поверхности PZ Моп. Такие восстановленные значения температур для разных показателей цвета приведены на рис. 4. Вычисленное с использованием всех показателей цвета среднее значение эффективной температуры $T_{\text{eff}} = 4717 \pm 45$ К хорошо согласуется с $T_{\text{eff}} = 4700 \pm 100$ К — значением, определенным из анализа спектральных линий (Пахомов и др., 2015), и $T_{\text{eff}} = 4730 \pm 50$ К — из фотометрических данных 2016–2017 гг. (Пахомов и др., 2018). В дальнейшем принимаем значение $T_{\text{eff}} = 4730$ К.

При расчете звездных величин (1) влияния межзвездного поглощения и холодных пятен схожи. Оба этих эффекта в ИК-части спектра оказывают меньше влияния, чем в видимой, т.е. величины $E(B - V)$ и S являются зависимыми, увеличение одной из них приведет к уменьшению другой. Принятое ранее значение $E(B - V) = 0.06$ mag получено из наблюдаемого значения $B - V$ и нор-

мального, вычисленного для температуры $T_{\text{eff}} = 4700$ К, определенной из анализа спектра. Для оценки влияния точности значения межзвездного покраснения $E(B - V)$ на точность определения площади пятна S была выполнена аппроксимация звездных величин PZ Моп в максимуме блеска теоретическими значениями (1) методом Левенберга–Марквардта. Результат вычислений: $S = 38 \pm 6\%$, $E(B - V) = 0.08 \pm 0.03$, что в пределах ошибок подтверждает ранее полученные значения.

При наличии такой значительной холодной области ожидаются и значительные колебания блеска, особенно в фильтре B , с амплитудой до $-2.5 \times \log(1 - 0.4 + 0.4 * 1/20) = 0.52^m$. Однако в случае PZ Моп амплитуда блеска в фильтрах B и V не превышает 0.15^m . Переменность не может быть вызвана холодной областью, поскольку тогда показатель цвета $B - V$ не должен меняться, но он переменен. Это можно объяснить постоянным присутствием холодной области на 41% видимого полушария звезды, то есть либо наличием полярного пятна, поскольку при наклоне оси вращения PZ Моп $i = 67^\circ$ (Пахомов и др., 2015) один полюс виден всегда, либо равномерным распределением пятен по всей фотосфере. Скорее всего оба варианта играют свою роль.

Такая модель хорошо описывает распределение энергии в спектре PZ Моп, вычисленное, согласно (Бесселл и др., 1998), из значений потоков в

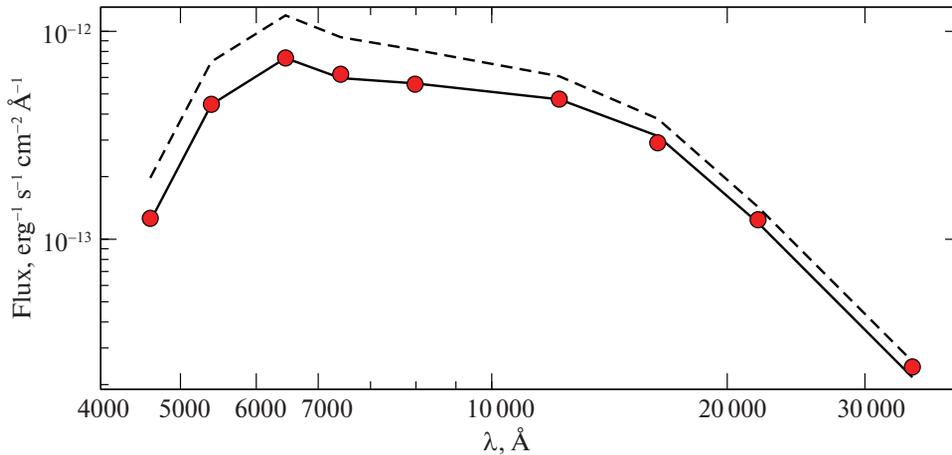


Рис. 6. Распределение энергии в спектре PZ Моп (кружки) по сравнению с нормальной звездой (штрихи) с параметрами $T_{\text{eff}}/\log g/[\text{Fe}/\text{H}]/E(B - V) = 4730/2.8/0.07/0.06$. Сплошная линия — теоретическое распределение при наличии пятен с $T_s = 3500$ К и относительной площадью $S = 41\%$.

отдельных фильтрах (см. рис. 6, где первая точка, соответствующая фильтру U , взята из работы Пахомова и др., 2018).

Теплое пятно

Модель холодного полярного пятна хорошо описывает значения максимумов блеска PZ Моп,

но для описания амплитуд изменения блеска в разных фильтрах необходимо добавить пятна с температурой выше, чем у полярного пятна T_s , и ниже, чем у спокойной фотосферы T_{eff} . Амплитуды блеска можно вычислить по формуле, аналогичной (1), с добавлением параметра, характеризующего теплые пятна площадью S_w :

$$\Delta m_X = -2.5 \lg \frac{10^{-0.4m_X^s} S_s + 10^{-0.4m_X} (1 - S_s)}{10^{-0.4m_X^s} S_s + 10^{-0.4m_X^w} S_w + 10^{-0.4m_X} (1 - S_s - S_w)}, \quad (2)$$

где индекс s относится к холодным пятнам, w — к теплым, без индекса — к незапятненной поверхности с $T_{\text{eff}} = 4730$ К. В формуле (2) использована информация о том, что теплое пятно расположено только в полусфере со стороны второго компонента, т.е. не проявляется в максимуме блеска PZ Моп. Полярное пятно присутствует постоянно с фиксированными значениями параметров $T_s = 3500$ К, $S_s = 41\%$. Поскольку $m_X^w = f(T_w)$, то $\Delta m_X = f(T_w, S_w)$ и из наблюдаемых амплитуд можно оценить температуру и площадь теплых пятен. Имеем эти две неизвестные и пять уравнений (2) для фильтров $BVRJI$ (для более длинноволновых фильтров точность наблюдений недостаточна) и, применяя метод Левенберга—Марквардта, получаем $T_w = 4493 \pm 106$ К, $S_w = 20 \pm 1\%$. При данных параметрах рассчитанные значения амплитуд описывают наблюдаемые

с точностью, превышающей ошибки наблюдений (рис. 3).

3. МОДЕЛЬ ЗАПЯТНЕННОЙ ФОТОСФЕРЫ PZ Моп

Построение модели распределения интенсивности по поверхности исследуемой звезды проведено по методике, аналогичной в работе (Пахомов и др., 2018). На карте размером 720×360 присутствует холодное полярное пятно радиусом 63.7° (это обеспечивает 41% видимой поверхности с учетом эффекта потемнения к краю) и теплая экваториальная область, которая в данной статье представлена несколько другой моделью. Она также располагается вдоль экватора и симметрична относительно него. Форма пятна задается в узловых точках с долготой l от -90° до 90° и шагом 30° значением

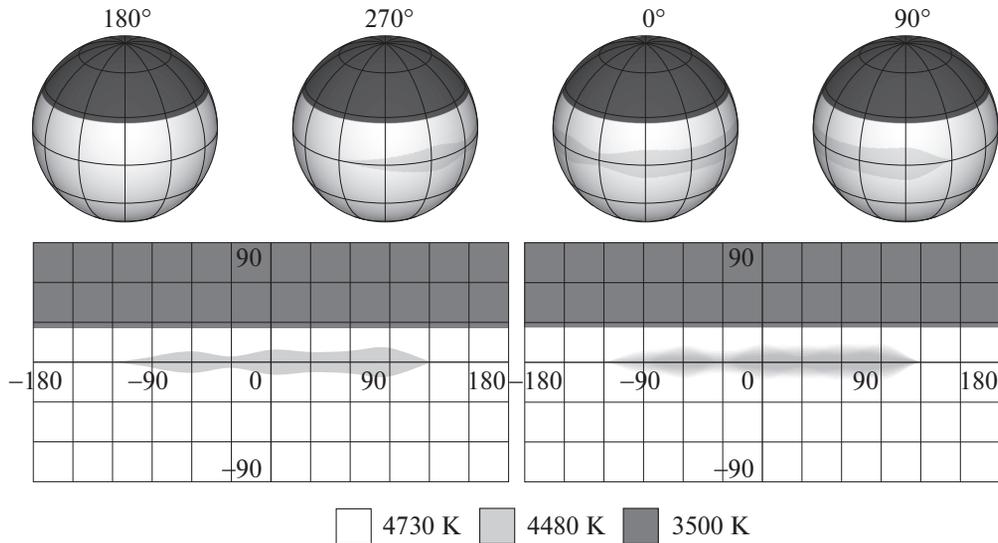


Рис. 7. Карты распределения температуры по фотосфере PZ Моп. Левая карта построена на основе вычисленных параметров модели, правая — на основе вариации параметров. Сверху — ортографические проекции звезды при разных значениях долготы центрального меридиана.

широты края пятна. Нулевой меридиан направлен на второй компонент этой двойной системы. Для всех долгот $|l| > 120^\circ$ широта края теплой области приравнивается нулю, так как при наблюдении противоположного полушария (это соответствует максимуму блеска) мы хорошо описываем эту часть кривой блеска без привлечения теплых пятен. Все точки соединены сплайном Акимы, что позволяет получить гладкую форму рассматриваемой области, поскольку значения сплайна в промежутке между узловыми точками не выходят за пределы их значений. В итоге имеем восемь параметров (семь значений широт и температура T_w), для поиска которых использовался метод нелинейной аппроксимации Левенберга–Марквардта. Эффект потемнения к краю был учтен с коэффициентами из работы (ван Хамм, 1993).

Мы ограничились аппроксимацией данных только двух фильтров B и V , поскольку они имеют наименьшую ошибку наблюдений и наиболее достоверные звездные величины. При этом в процессе моделирования вычислялись кривые блеска во всех фильтрах. В качестве начального приближения использовали $T_w = 4500$ К и два вида пятна: 1) в виде полосы — широта всех точек одинакова, фактор заполнения равен ранее найденной оценке 20%; 2) в виде широкого пятна на центральном меридиане в пределах долгот $|l| < 60^\circ$. В обоих случаях решения сошлись на близких значениях параметров, а вычисленные кривые блеска описывают наблюдаемые с точностью 0.01^m (рис. 1 и 2). Температура теплых

пятен $T_w = 4480 \pm 80 \pm 200$ К, где первая ошибка соответствует неопределенности определения температуры при фиксированной форме и площади пятна, вторая — при свободе всех параметров.

На рис. 7 представлены результаты моделирования. Левая карта построена на основании вычисленных параметров. Температура поверхности определяется тремя значениями: для спокойной фотосферы $T_{\text{eff}} = 4730$ К, для холодного полярного пятна $T_s = 3500$ К, для теплого экваториального пятна $T_w = 4480$ К. Ортографические проекции звезды с разным значением наблюдаемого центрального меридиана показаны сверху. Правая карта построена на основании вариации параметров. Каждый параметр, т.е. широта границы пятна в конкретной узловой точке, варьировался на величину от -4° до $+4^\circ$ с шагом 2° . Выполнено более 80 000 вычислений отдельных карт. Затем каждая точка карты была усреднена с весом, обратно пропорциональным квадрату ошибки описания наблюдений, которая составила от 0.010^m до 0.025^m . На этой карте вследствие усреднения представлен диапазон температур для теплого пятна T_w от 4480 до 4720 К. Видно, что обе карты очень похожи, выделяется протяженная область от нулевого меридиана до 90° , а также почти отдельное пятно в районе $l = -60^\circ$. Несмотря на то что при аппроксимации наблюдений использовались только два фильтра из восьми, для большинства других вычисленные значения не отличаются от наблюдаемых в пределах ошибок. Наибольшие расхождения (их значения приведены на рис. 2 в нижнем левом углу каждого графика) выявлены

для инфракрасных фильтров H и L . Отклонения данных для этих фильтров видны и на рис. 4, 5 и, возможно, связаны с ошибками наблюдений.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Построенная в данной работе параметрическая трехкомпонентная модель распределения температуры по фотосфере активного гиганта PZ Моп описывает в пределах ошибок наблюдений все кривые блеска в разных фильтрах от синего B ($\lambda_{\text{cen}} = 4380 \text{ \AA}$) до инфракрасного L ($\lambda_{\text{cen}} = 34500 \text{ \AA}$). Модель состоит из спокойной фотосферы с температурой $T_{\text{eff}} = 4730 \text{ K}$, полярного пятна радиусом 63.7° и температурой $T_s = 3500 \text{ K}$ и экваториальной области промежуточной температуры $T_w = 4480 \text{ K}$, расположенной в полушарии со стороны второго компонента. Карта на рис. 7 схожа с картой, построенной в работе (Пахомов и др., 2018) для эпохи начала 2015 г., когда кривая блеска показывала подобное поведение. Также присутствуют протяженная область, справа от нулевого меридиана, и отдельное пятно в районе $l = -60^\circ$. Вся активная теплая область распределена на большом диапазоне долгот, а не сосредоточена около нулевого меридиана, как предполагалось ранее. Выделить одну активную долготу не представляется возможным.

Эта простая и приближенная модель не описывает широтное распределение пятен и эффекты дифференциального вращения, что недоступно и более сложным методам, основанным на анализе кривых блеска и решении обратной задачи (см., например, Саванов и Штрассмаер, 2008), для этого необходим спектральный мониторинг звезды и высокоточные данные фотометрии. Однако вклад как теплых, так и холодных пятен для каждой отдельной долготы должен быть близок к реальным значениям. Допплеровская томография и интерферометрические наблюдения звезд с пятнами в двойных системах типа RS CVn показывают похожую картину: как полярные холодные области (ζ And — Роттенбахер и др., 2016) (σ^2 CrB — Росьен и др., 2018), так и высокоширотные (SV Cam — Сенавчи и др., 2018), а также распределенные по поверхности (σ Gem — Роттенбахер и др., 2017). Промежуточные температуры со значением от самых холодных (около 3500 K) до температуры спокойной фотосферы присутствуют во всех случаях. Существенное отличие принятой модели от данных доплеровских томограмм и интерферометрических наблюдений — это размеры полярного пятна, которые составляют до $20\text{--}30^\circ$, что значительно меньше, чем в нашей модели. Холодная область, вполне возможно, расположена на обоих полюсах. В этом случае радиус одинаковых полярных пятен составит 56.4° , что лишь немного меньше размера

при размещении только на одном полюсе, так как при принятом наклоне оси вращения PZ Моп значительная область около противоположного полюса не видна. Но и эта величина в 2 раза больше, чем ожидается из наблюдений, поэтому можно предположить, что около половины всех холодных пятен (или площадью 20% видимой поверхности) более или менее равномерно расположены вне полюсов.

Присутствие значительной доли холодных активных областей должно сопровождаться наличием магнитного поля. Росьен и др. (2018) для системы σ^2 CrB построили карты распределения интенсивности и магнитного поля, величина которого по модулю достигает $0.4\text{--}0.6 \text{ кГс}$ в холодных активных областях. В системе PZ Моп также можно ожидать проявление эффектов магнитного поля в спектре звезды. Ранее по спектру с разрешением около $R = 40000$ мы не обнаружили зависимости ширины спектральных линий от их фактора Ланде, возможно, по причине небольшой величины спектрального разрешения (инструментальное уширение линии сравнимо с уширением вращения звезды). В дальнейшем планируется получить и проанализировать спектры более высокого качества с разрешением не менее 80000. В красной части спектра холодные области должны лучше проявляться, и есть возможность найти следы магнитного поля.

Работа С.Ю. Горды проведена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (базовая часть гос. задания, РКАААА-А17-117030310283-7), а также при финансовой поддержке Правительства Российской Федерации (постановление 211, контракт 02.A03.21.0006).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бесселл и др. (M.S. Bessell, F. Castelli, and B. Plez), *Astron. Astrophys.* **333**, 231 (1998).
2. ван Хамм В. (W. van Hamme), *Astron. J.* **106**, 2096 (1993).
3. Пахомов Ю.В., Горыня Н.А., Письма в Астрон. журн. **41**, 734 (2015) [Yu.V. Pakhomov and N.A. Gorynya, *Astron. Lett.* **41**, 677 (2015)].
4. Пахомов и др. (Yu.V. Pakhomov, N.N. Chugai, N.I. Bondar', N.A. Gorynya, and E. A. Semenko), *MNRAS* **446**, 56 (2015).
5. Пахомов и др. (Yu.V. Pakhomov, K.A. Antonyuk, N.I. Bondar', and N.V. Pit), *ASP Conf.* **510**, 128 (2017).
6. Пахомов Ю.В., Антонюк К.А., Бондарь Н.И. и др., Письма в Астрон. журн. **44**, 38 (2018) [Yu.V. Pakhomov, K.A. Antonyuk, N.I. Bondar', N.V. Pit', I.V. Reva, and A.V. Kusakin, *Astron. Lett.* **44**, 35 (2018)].
7. Поймански (G. Pojmanski), *Acta Astron.* **47**, 467 (1997).

8. Росьен и др. (L. Rosén, O. Kochukhov, E. Alecian, C. Neiner, J. Morin, G.A. Wade, BinaMieS Collaboration), *Astron. Astrophys.* **613**, A60 (2018).
9. Роттенбахер и др. (R.M. Roettenbacher, J.D. Monnier, H. Korhonen, A.N. Aarnio, F. Baron, X. Che, R.O. Harmon, Z. Kóvári, et al.), *Nature* **533**, 217 (2016).
10. Роттенбахер и др. (R.M. Roettenbacher, J.D. Monnier, H. Korhonen, R.O. Harmon, F. Baron, T. Hackman, G.W. Henry, G.H. Schaefer, et al.), *Astrophys. J.* **849**, 120 (2017).
11. Саванов, Штрассмаер (I.S. Savanov and K.G. Strassmeier), *Astronomische Nachrichten* **329**, 364 (2008).
12. Сенавчи и др. (H.V. Şenavcı, E. Bahar, D. Montes, S. Zola, G.A.J. Hussain, A. Frasca, E. Işık, O. Yörükoğlu), *MNRAS* **479**, 875 (2018).
13. Хенден и др. (A.A. Henden, S. Levine, D. Terrell, and D.L. Welch), *Am. Astron. Soc. Pacific* **225**, 336.16 (2015).
14. Экер и др. (Z. Eker, N.F. Ak, S. Bilir, D. Doğru, M. Tüysüz, E. Soydugan, H. Bakış, B. Uğraş, et al.), *MNRAS* **389**, 1722 (2008).