

О влиянии «красной утечки» светофильтров на оценки блеска звезд поздних спектральных классов на примере наблюдений быстрой переменности симбиотических звезд

Г.Э. Никишев,¹ Н.А. Масленникова,^{1,*} А.М. Татарников,¹ К.Ю. Парусов,¹ А.А. Белинский²

¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, физический факультет
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

²Государственный Астрономический Институт имени П.К. Штернберга МГУ
Россия, 119234, Москва, Университетский проспект, д. 13

(Поступила в редакцию 22.09.2023; после доработки 14.10.2023; подписана в печать 17.10.2023)

Представлены результаты моделирования зависимости величины «красной утечки» фотометрических фильтров от разных факторов при наблюдениях звезд: показателя цвета $V - R$, класса светимости, величины межзвездного покраснения, воздушной массы и содержания водяного пара в атмосфере Земли. Ошибка, возникающая из-за неучета «красной утечки» в случае фильтров, использующихся на 0.6-м телескопе КГО ГАИШ, может составлять до $0.6^m - 0.8^m$ для звезд поздних спектральных классов. Для фильтров U и B представлены алгоритмы редукции наблюдательных данных. Приведены результаты наблюдений быстрой переменности двух симбиотических звезд SH Cyg и SU Lyn с холодными компонентами очень поздних спектральных классов. Для SH Cyg быстрая переменность была обнаружена в обе даты наблюдений. С учетом эффекта «красной утечки» амплитуда изменений блеска в полосе B составила 0.10^m 06.11.2019 и 0.19^m 15.12.2022 при характерном времени переменности около 20 мин. У SU Lyn быстрая переменность блеска в полосе B 25.02.2023 обнаружена не была (с точностью до 0.003^m).

PACS: 95.75.De, 95.85.Kr УДК: 520.8.07

Ключевые слова: фотометрия, фотометрические системы, симбиотические звезды.

DOI: [10.55959/MSU0579-9392.78.2360801](https://doi.org/10.55959/MSU0579-9392.78.2360801)

ВВЕДЕНИЕ

Симбиотические звезды представляют собой двойные системы, в спектрах которых одновременно виден спектр холодной звезды — красного гиганта и эмиссионные линии с высоким потенциалом ионизации, характерные, например, для спектров планетарных туманностей [1]. Таким образом, одним компонентом двойной системы выступает красный гигант с температурой порядка 3500 К (иногда красный сверхгигант или желтый гигант), а вторым — горячий субкарлик (звезда, похожая на центральные звезды планетарных туманностей) с температурой $T_{hot} > 30000$ К (в некоторых системах в качестве горячего компонента выступает белый карлик или нейтронная звезда). Максимум излучения горячего компонента приходится на далекий ультрафиолетовый (УФ) диапазон, поэтому он ионизует вещество, теряемое холодным компонентом. В результате образуется протяженная ионизованная оболочка, в которой образуются такие линии излучения, как H I, He I, He II, [O III] и др. Вокруг горячего компонента симбиотической звезды может существовать аккреционный диск (например, [2–5]). Такое сочетание в одной системе объектов разных типов приводит к тому, что у симбиотических звезд наблюдаются проявления активности разных масштабов (от тысячных долей звездной величины до нескольких величин) и на разных временных интервалах — от нескольких минут до десятков и сотен лет.

Одним из типов переменности некоторых симбиотических звезд является быстрая переменность блеска, похожая по своим параметрам на фликкер-эффект катаклизмических двойных [6] — переменность с характерной амплитудой до десятых долей звездной величины на временах от нескольких минут до часа. При этом переменность может быть как периодической (например, у BF Cyg [7] или Z And [8]), так и неправильной — SH Cyg [9], T CrB [10], CSS 1102 [11] и др. Источником переменности в первом случае является вращение горячего компонента, а во втором — по всей видимости, нестационарные явления при аккреции вещества.

Поиск и исследование быстрой переменности симбиотических звезд в настоящее время проводятся фотометрически с помощью ПЗС-камер. Наблюдения при этом ведутся в спектральном диапазоне, в котором ожидается максимальный вклад переменного источника. Холодный компонент системы имеет максимум излучения в красной или ближней инфракрасной (ИК) области спектра, его излучение на характерных временах мониторинга (сотни минут) можно считать постоянным, и его вклад быстро падает с уменьшением длины волны. Поэтому

* E-mail: maslennikova.na16@physics.msu.ru

наблюдения обычно проводятся в полосах U или B (центральная длина волны 360 нм или 440 нм соответственно). Однако современные ПЗС-приемники имеют очень широкую полосу чувствительности, простирающуюся от 300–350 нм до 1100–1200 нм. Если используемый коротковолновый светофильтр имеет пропускание не только в рабочей области, но и в красной области спектра — так называемую «красную утечку» (red leak), то при наблюдениях будут регистрироваться не только фотоны в полосе, например B , но и какая-то часть фотонов из длинноволновой области. При наблюдении очень красных объектов (например, поздних М-звезд) эффект может быть очень велик даже при малой (доли процента) величине красной утечки светофильтра. Воздействию красной утечки были подвержены, например, УФ-фильтры космического телескопа «Хаббл»¹ и фильтр u обзора SDSS². Известно и о необходимости учета красной утечки при наблюдениях симбиотических звезд [12]. В какой-то мере уменьшить влияние этого эффекта можно подбором звезд сравнения близких спектральных классов. Однако это не всегда возможно — во-первых, такие звезды могут иметь собственную переменность, а во-вторых, звезд с нужными показателями цвета может просто не оказаться в поле зрения фотометра.

Целью настоящей работы является исследование влияния «красной утечки» фильтров ПЗС-фотометра телескопа RC600 Кавказской горной обсерватории ГАИШ МГУ (КГО) на результаты фотометрии красных звезд и определение методики учета этого влияния на примере обработки наблюдений быстрой переменности симбиотической звезды SN Sng и переменной SU Lup, заподозренной в принадлежности к классу симбиотических звезд, холодные компоненты которых имеют поздние спектральные классы.

1. НАБЛЮДЕНИЯ

В КГО ГАИШ [13] с 2019 г. активно работает 0.6-метровый телескоп RC600 производства ASA (Австрия). На нем проводятся большие объемы фотометрических наблюдений. Для этого используется ПЗС-фотометр [14] на базе ПЗС-матрицы Andor iKON-L (формат кадра 2048x2048 пикселей, масштаб изображения 0.67"/пиксель). Фотометр оснащен колесом фильтров, в котором расположены $UBVR_cI_c$ -фильтры фотометрической системы Джонсона–Казинса. Кривые пропускания фильтров VR_cI_c приведены на сайте КГО ГАИШ МГУ³.

Используемые в работе полосы R_c и I_c далее в тексте будут обозначены как R и I . Кривые чувствительности детектора ПЗС-матрицы и прописанные на спектрофотометре *Avantes avaspec 2048* кривые пропускания коротковолновых светофильтров U и B , используемых с 2019 г., приведены на рис. 1. Также на RC600 установлены фильтры g' , r' , i' и z' фотометрической системы SDSS. Кривая пропускания коротковолнового фильтра g' вне основной полосы очень похожа на кривую пропускания B , поэтому результаты наших исследований «красной утечки» в полосе B применимы и к наблюдениям в этом фильтре.

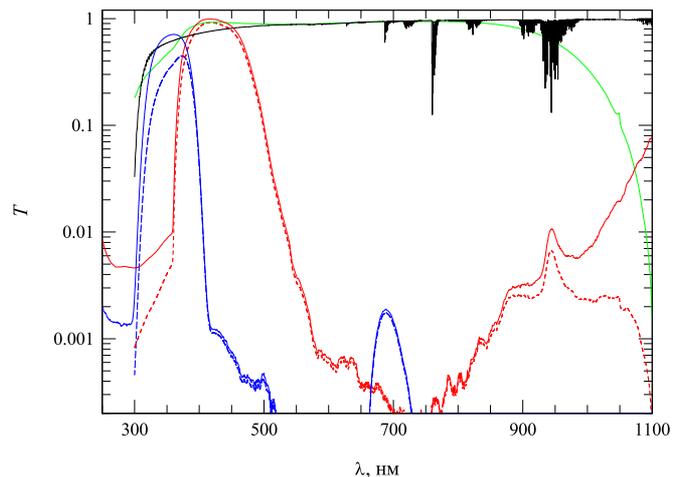


Рис. 1. Кривые пропускания фильтров U (синяя линия) и B (красная линия), атмосферы (черная линия), входного окна камеры (фиолетовая линия) и кривая чувствительности ПЗС-камеры Andor iKON-L (зеленая линия). Штриховыми линиями показаны кривые реакции соответствующих инструментальных полос (произведение пропускания фильтров, входного окна и чувствительности камеры)

Рассматриваемые ниже фотометрические наблюдения проводились на RC600. Симбиотическую звезду SN Sng наблюдали 06.11.2019 и 15.12.2022 в полосе B . Заподозренная в принадлежности к симбиотическим звездам [15] переменная SU Lup наблюдалась 25.02.2023 в полосе U . Обработка фотометрических наблюдений проводилась стандартным образом (учет уровня подложки, темнового тока и плоского поля, апертурная фотометрия) с помощью *MaxIm DL*. Ошибки оценивались по звездам поля, блеск которых близок к звездным величинам объектов. Для SN Sng ошибки одиночного измерения 06.11.2019 составили 0.006^m , 15.12.2022 — 0.005^m , для SU Lup — 0.003^m .

2. СИНТЕТИЧЕСКАЯ ФОТОМЕТРИЯ

Как видно из рис. 1, светофильтры U и B , используемые на телескопе RC600 в настоящее время, имеют значительную красную утечку. Для фильтра U она представлена в виде узкого пика на длине вол-

¹ https://www.stsci.edu/instruments/wfpc2/wfpc2_hand/HTML/W2_30.html

² <https://www.sdss4.org/dr17/imaging/caveats/>

³ http://lnfm1.sai.msu.ru/kg0/instruments/filters/KGO_FILTER_DATA.html

ны 700 нм с пропусканием в максимуме около 0.2%, а у фильтра B она состоит из двух областей — красной (в диапазоне длин волн 550–700 нм со средним пропусканием $< 0.1\%$) и обширной инфракрасной со средним пропусканием около 1%.

На итоговую величину красной утечки влияют также пропускание атмосферы Земли и входного окна камеры, чувствительность приемника излучения. На рис. 1 приведена кривая пропускания земной атмосферы для высокогорной обсерватории (высота КГО примерно 2100 м над уровнем моря). Она была получена по данным онлайн-калькулятора ESO SkyCalc⁴ для высоты 2400 м и содержания воды PWV=2.5 мм, а затем в соответствии с [16] приведена к высоте и давлению, характерным для КГО. Видно, что влиянием атмосферы на величину утечки можно практически пренебречь. Кривая чувствительности ПЗС-приемника имеет завалы как в УФ-, так и в ИК-части спектра, и по-разному влияет на рассматриваемые фильтры. УФ-завал кривой снижает эффективность фильтра U в его рабочей полосе пропускания (увеличивая тем самым относительный вклад красной утечки). ИК-завал кривой значительно влияет на величину ИК-части утечки B -фильтра (см. рис. 1).

Для определения величины вклада красной утечки в сигнал в коротковолновых инструментальных полосах мы провели синтетическую фотометрию по спектрам звезд различных спектральных классов (от O5 до M10), представленных в библиотеке спектров [17]. Синтетический сигнал для звезды каждого спектрального класса вычислялся путем интегрирования свертки спектра $I(\lambda)$ с кривой пропускания атмосферы $A(\lambda)$ и кривыми реакции инструментальных полос $F(\lambda)$, показанных на рис. 1 (множитель λ под интегралом служит для перевода энергии в число фотонов):

$$N_{ph} \sim \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \lambda I(\lambda) A(\lambda) F(\lambda) d\lambda. \quad (1)$$

Тогда величину красной утечки в звездных величинах можно вычислить по формуле:

$$\delta \text{mag} = 2.5 \lg \frac{\int_{300}^{1100} \lambda I(\lambda) A(\lambda) F(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \lambda I(\lambda) A(\lambda) F(\lambda) d\lambda}. \quad (2)$$

В числителе интегрирование ведется по всей спектральной полосе, а в знаменателе — между длинами волн, ограничивающими рабочую полосу фильтра (для фильтра U $\lambda_1 = 315$ нм, $\lambda_2 = 470$ нм, для фильтра B $\lambda_1 = 365$ нм, $\lambda_2 = 575$ нм).

Показатели цвета $V - R$ для каждого спектра также вычислялись методами синтетической фотометрии. При этом в качестве стандарта выступал спектр звезды A0V, а фильтры V и R считались свободными от красной утечки.

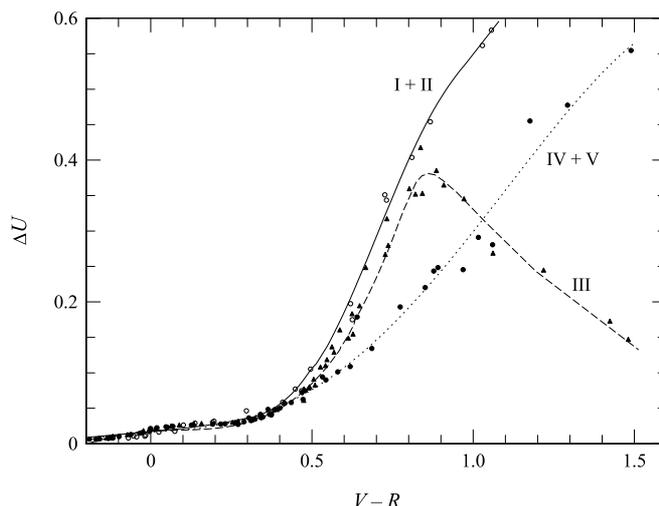


Рис. 2. Зависимость величины красной утечки в полосе U от цвета для звезд разных классов светимости (кружки — I и II классы, треугольники — III класс, черные точки — IV и V классы; соответствующими линиями показаны сглаженные зависимости)

На рис. 2 приведены результаты вычислений величины красной утечки для фильтра U . Видно, что для звезд поздних спектральных классов (позднее примерно G0, $(V - R) \gtrsim 0.5$) единая зависимость величины утечки от показателя цвета разделяется на две: для I–III классов и IV–V классов. В области $(V - R) \approx 0.8$ (K-звезды) кривые разделяются еще раз — для красных гигантов с ростом показателя цвета происходит уменьшение величины утечки. Таким образом, для корректного учета утечки в полосе U требуется знать не только цвет звезды (или спектральный класс), но и класс светимости.

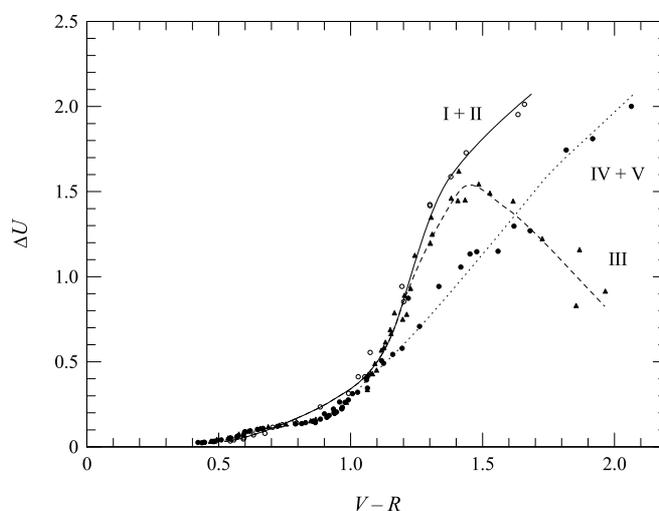


Рис. 3. Зависимость величины красной утечки в полосе U от цвета для случая межзвездного покраснения с избытком цвета $E(B - V) = 1$ для звезд разных классов светимости

⁴ <https://www.eso.org/observing/etc/bin/gen/form?INS.MODE=swspectr+INS.NAME=SKYCALC>

Как показывают расчеты, на величину красной утечки влияет не только показатель цвета, но и ве-

личина межзвездного покраснения. На рис. 3 приведены данные об утечке в полосе U для случая $E(B-V) = 1$. Величина красной утечки сильно возросла по сравнению со значениями, полученными при $E(B-V) = 0$ (рис. 2). Видно, что по-прежнему можно выделить отдельные зависимости утечки от цвета для звезд поздних спектральных классов разных классов светимости. Утечка быстро растет с увеличением $V-R$ и достигает 2^m (т.е. вклад утечки в суммарный сигнал в 6 раз превышает полезный сигнал).

В полосе B (рис. 4) практически не наблюдается разделение зависимости по классам светимости звезд — величина утечки медленно увеличивается от 0 для горячих звезд до 0.05^m для звезд спектрального класса $K0-K1$, после чего начинается ее резкий рост, и при $V-R \sim 1.5$ она может превышать 0.5^m . Межзвездное покраснение так же, как и в случае с полосой U , значительно увеличивает величину утечки для звезд тех же спектральных классов.

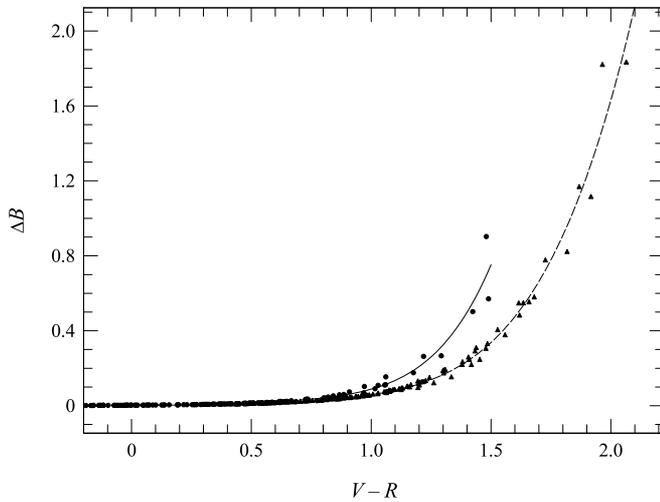


Рис. 4. Зависимость величины красной утечки в полосе B от цвета для звезд I–V классов светимости в случае отсутствия межзвездного покраснения (точки и сплошная линия) и в случае избытка цвета $E(B-V) = 1$ при нормальном законе покраснения (треугольники и штриховая линия)

Существуют еще как минимум два фактора, влияющих на наблюдаемое распределение энергии в спектрах звезд: изменение поглощения излучения земной атмосферой вследствие изменения высоты объекта над горизонтом и изменение содержания водяного пара. Влияние этих факторов на величину «красной утечки» показано на рис. 5 и 6 для полосы U и на рис. 7 и 8 для полосы B . Видно, что в полосе U влияние содержания водяного пара в атмосфере практически не заметно, в полосе B это влияние есть и может достигать $\sim 0.1^m$ для красных звезд.

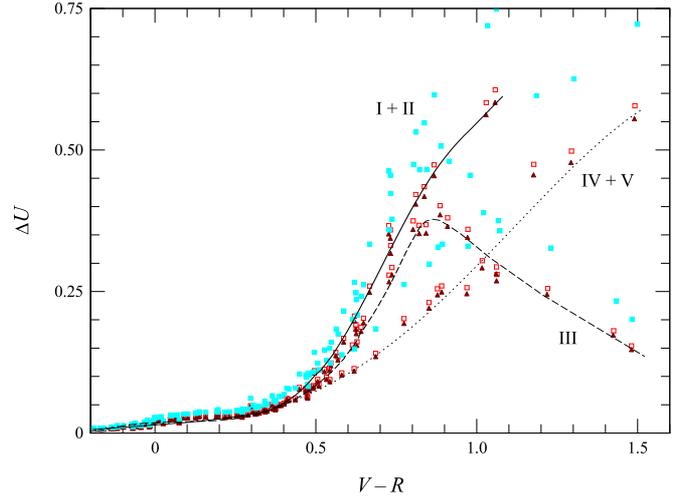


Рис. 5. Зависимость величины красной утечки в полосе U от цвета звезд для разных значений воздушной массы при $PWV = 2.5$ мм: $M_z = 1$ — черные треугольники, $M_z = 1.15$ — красные квадратики, $M_z = 2$ — голубые квадратики. Линиями показаны положения последовательностей, выделенных на рис. 2

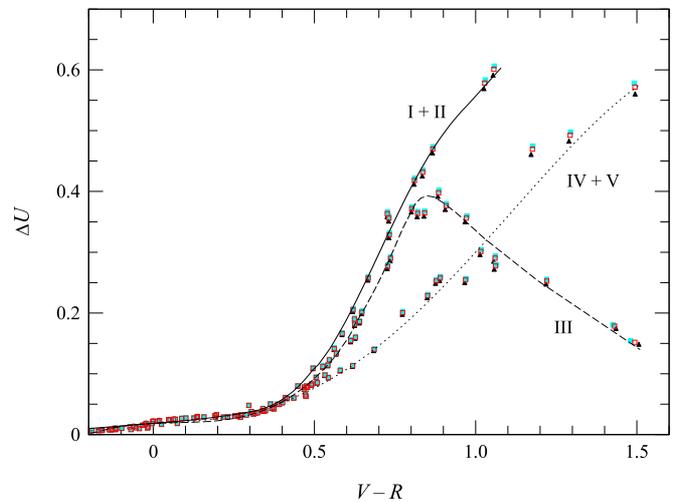


Рис. 6. Зависимость величины красной утечки в полосе U от цвета звезд для разных значений PWV при $M_z = 1.15$: $PWV = 2.5$ мм — черные треугольники, $PWV = 10$ мм — красные квадратики, $PWV = 30$ мм — голубые квадратики. Линиями показаны положения последовательностей, выделенных на рис. 2

3. ФОТОМЕТРИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ СИМБИОТИЧЕСКИХ ЗВЕЗД

Фотометрические мониторинги с целью поиска и исследования быстрой переменности симбиотических звезд в КГО периодически проводятся на телескопе RC600. Обычно они занимают 2–4 часа (при характерном времени переменности 10–60 мин, см., например, [11], [18]), в течение которых непрерывно (с промежутком на время считывания, которое для матрицы *Andor iKON-L* равно 4 с) снимаются кадры с участком неба вокруг исследуемой звезд

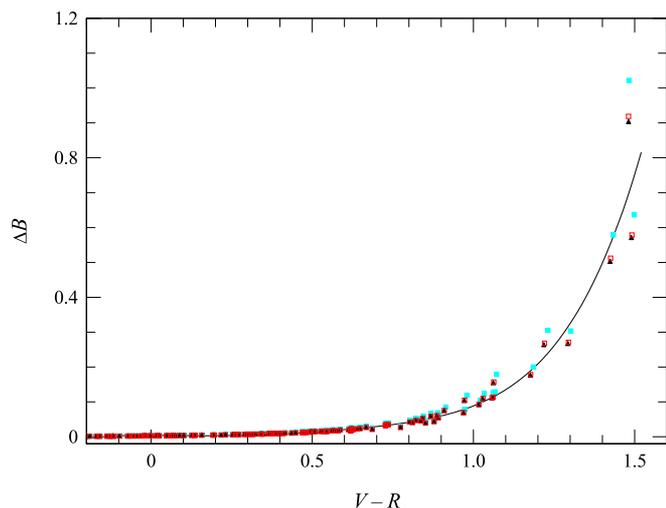


Рис. 7. Зависимость величины красной утечки в полосе B от цвета звезд для разных значений воздушной массы при $PWV = 2.5$ мм. Обозначения те же, что на рис. 5

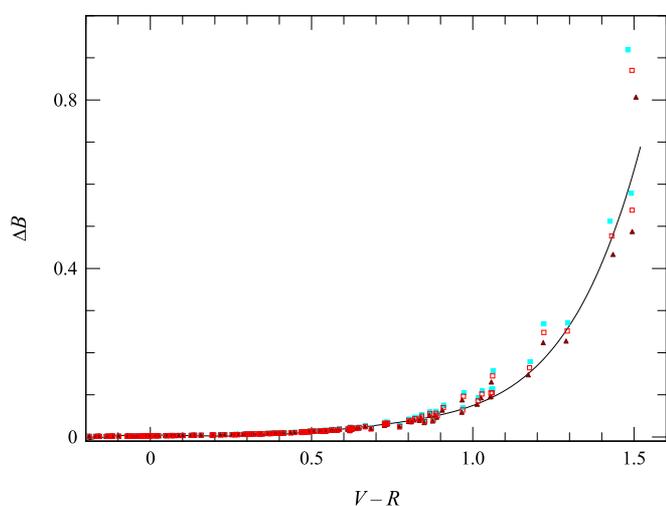


Рис. 8. Зависимость величины красной утечки в полосе B от цвета звезд для разных значений PWV при $Mz = 1.15$. Обозначения те же, что на рис. 6

ды. Оценки блеска проводились методом апертурной фотометрии путем сравнения сигналов, накопленных на каждом кадре от переменной звезды и от звезд сравнения. Считается, что звезды сравнения должны иметь близкий к исследуемой звезде спектральный класс — это позволяет избегать некоторых проблем при редукции наблюдений. В случае наблюдений симбиотических звезд это требование сложно выполнить, т.к. одним из компонентов симбиотической звезды обычно является красный гигант позднего спектрального класса и такие звезды могут не оказаться в непосредственной близости к переменной. Поэтому в качестве звезд сравнения выступают все звезды поля, имеющие достаточное отношение сигнал/шум.

Быстрая переменность симбиотической звезды, или фликкер-эффект (flickering), — хаотическое из-

менение блеска звезды, связанное с аккреционным диском или горячим компонентом, излучение которых вносит заметный вклад в общий поток от системы в полосах U и B и почти не заметно в более длинноволновых полосах, где доминирует излучение красного гиганта. Поток от красного гиганта можно считать постоянным на характерных временах фликкер-эффекта, поэтому добавочный сигнал от красной утечки остается постоянным при наблюдениях быстрой переменности блеска. Однако у многих симбиотических звезд наблюдаются активные и спокойные состояния, в которых скорость аккреции разная, то есть изменяется вклад аккреционного диска в блеск системы в коротковолновых полосах. Таким образом, в голубой области спектр симбиотической звезды сильно отличается от спектра нормальных звезд, поэтому для учета красной утечки нельзя непосредственно использовать графики, представленные выше и предназначенные для коррекции наблюдений нормальных звезд.

В общем случае для вычисления величины красной утечки необходимо знать распределение энергии в красной области (спектральный класс или показатель цвета), величину межзвездного избытка цвета, блеск в полосе R или I и высоту объекта во время наблюдений. Используя эти данные и кривые пропускания фильтров, входного окна камеры и кривую чувствительности детектора, вычисляется количество фотонов красной утечки для данного объекта. Измеренный при наблюдениях блеск объекта в полосах U или B пересчитывается в поток фотонов, из которого и вычитается рассчитанная красная утечка. После этого происходит перевод потока обратно в звездные величины.

Для случая, когда в красной области спектра объект представляет собой нормальную звезду (например, красный гигант в симбиотической системе) можно использовать данные рис. 2–8 с коррекцией за отличие блеска системы в полосе U (или B) от ожидаемого для нормальной звезды спектрального класса, совпадающего с классом красного гиганта.

На рис. 9 приведены результаты наблюдений быстрой переменности SN Cyg в полосе B , выполненных 6 ноября 2019 г. и 15 декабря 2022 г. Продолжительность первого мониторинга составила 2 ч 12 мин, второго — около 45 мин. На обеих кривых блеска хорошо заметны нерегулярные колебания блеска. Максимальная амплитуда составила 0.07^m и 0.17^m соответственно при стандартном отклонении блеска контрольной звезды 0.006^m и 0.005^m . Характерное время переменности на кривой 2019 г. выделить сложно, но можно отметить несколько кратковременных (длительностью несколько минут) эпизодов изменения блеска. На кривой 15.12.2022 хорошо заметны такие же кратковременные подъемы блеска с амплитудой $\sim 0.1^m$, разделенные промежутком времени в 20 мин, и малоамплитудный фликкер-шум между ними.

Для учета красной утечки в кривых блеска SN Cyg были взяты следующие параметры си-

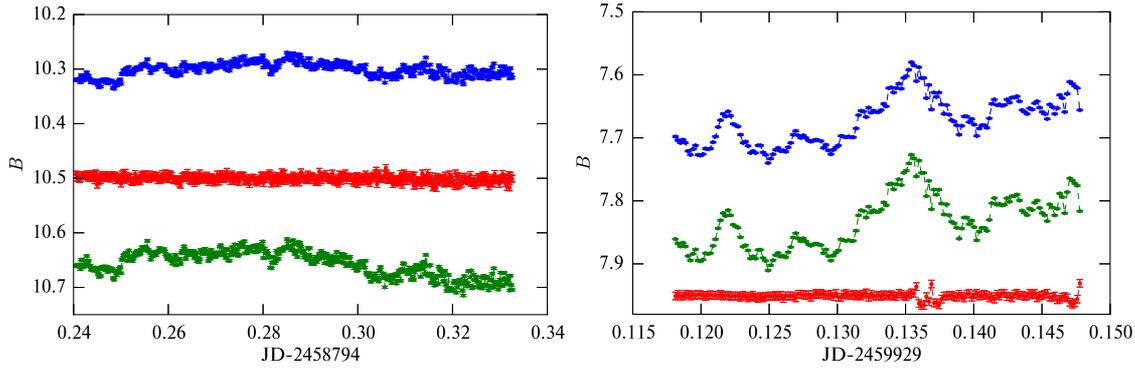


Рис. 9. Кривые блеска SN Cyg в полосе B (наблюдаемая — синие точки, исправленная за красную утечку — зеленые точки) и контрольной звезды (красные точки), полученные 06.11.2019 (левая панель) и 15.12.2022 (правая панель). Контрольные звезды на $\sim 3^m$ слабее переменной и их кривые блеска произвольно сдвинуты по оси ординат

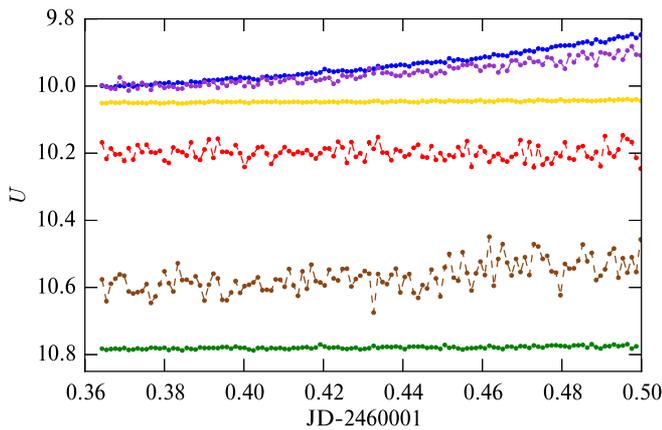


Рис. 10. Кривые блеска SU Lyn в полосе U (наблюдаемая кривая — синие точки, исправленная за красную утечку — зеленые точки) и звезд сравнения с показателями цвета $V - R = 0.75$ (фиолетовые точки), $V - R = 0.63$ (коричневые точки) и $V - R < 0.32$ (красные и желтые точки). Кривые блеска звезд сравнения произвольно сдвинуты по оси ординат, более слабые звезды показывают большую дисперсию оценок блеска

стемы: спектральный класс холодного компонента SN Cyg — M7III [19] ($V - R = 1.42^m$), $E(B - V) = 0$ [20]. Блеск SN Cyg в полосе R , согласно [21], 06.11.2019 составлял $\sim 7.2^m$, а 15.12.2022 — $\sim 5.3^m$. Высота объекта во время наблюдений изменялась в диапазоне $51\text{--}25^\circ$ (воздушная масса составляла 1.3–2.4).

Исправленные кривые блеска приведены на рис. 9. Несмотря на то, что в 2019 г. холодный компонент SN Cyg был на 2^m слабее, чем в 2022 г., средняя величина красной утечки 06.11.2019 оказалась выше — она равнялась примерно 0.4^m , а в 15.12.2022 — 0.17^m . Это связано с тем, что вклад горячего компонента в полосе B в 2019 г. оказался значительно ниже (на $\sim 3^m$), что и привело к большому относительному вкладу утечки. После утечки амплитуда быстрой переменности блеска увеличилась 06.11.2019 на 30% (с 0.07^m до 0.10^m), а 15.12.2022 — примерно на 10% (с 0.17^m до 0.19^m). Блеск SN Cyg в полосе B стал слабее (10.66^m и 7.83^m соответственно). Из рис. 9 (левая панель)

видно, что коррекция утечки позволила выявить завал на кривой блеска на $JD - 2458794 > 0.28$, замытый дополнительная красной утечкой, связанной с увеличением M_z во время мониторинга.

Кривые блеска SN Cyg сильно различаются (рис. 9); 15.12.2022, по сравнению с 6.11.2019, увеличился блеск в полосе B на $\sim 3^m$ и амплитуда фликкер-эффекта в 2 раза, показатель цвета $B - V$ уменьшился с 1.8^m до 1.3^m [21], что указывает на увеличение вклада аккреционного диска в блеск системы. Несмотря на то, что SN Cyg — двойная система с орбитальным периодом 15.6 лет и периодом пульсаций красного гиганта 750 дней [22], объяснить эти изменения затмением горячего компонента не получится, т.к. 06.11.2019 орбитальная фаза составляла 0.19, а 15.12.2022 — 0.39. В спокойном состоянии в спектре SN Cyg доминирует излучение холодного компонента — красного гиганта, вклад аккреционного диска и туманности в голубой области спектра становится заметен только при увеличении скорости аккреции [23]. Поэтому можно предположить, что 06.11.2019 аккреционный диск имел небольшую светимость, а наблюдения 15.12.2022 пришлось на период значительно возросшего темпа аккреции, поэтому увеличился вклад аккреционного диска в блеск системы в полосе B и возросла амплитуда фликкер-эффекта.

На рис. 10 показан результат измерений блеска SU Lyn ($V - R = 1.5$) в течение более 3 ч. Хорошо видно, что на кривой блеска переменной отсутствуют какие-либо колебания, но при этом наблюдается почти линейный тренд — за 200 мин блеск увеличился на 0.15^m . Тренд можно заметить и у звезд сравнения с большим показателем цвета: для звезды с $V - R = 0.75$ изменения блеска составили 0.10^m , для звезды с $V - R = 0.63$ — 0.09^m . Блеск звезд сравнения, имеющих небольшие показатели цвета $V - R$, при этом не демонстрировал какого-либо тренда. За время наблюдений высота звезды изменилась с 57° до 30° (воздушная масса составляла 1.2–2).

Холодный компонент SU Lyn — красный гигант спектрального класса M5III [24], окруженный пылевой оболочкой, поэтому звезда имеет достаточ-

но большой избыток цвета $E(B - V) = 0.64$. Исправленный за это значение покраснения спектр SU Lyn хорошо совпадает со спектром красного гиганта M5III даже в голубой области. Таким образом, вкладом аккреционного диска, если он присутствует в системе, можно пренебречь в полосах U и B . Поэтому для исправления красной утечки использовались графики, аналогичные на представленным на рис. 2 и 5. Величина красной утечки для SU Lyn, составила от 0.77^m до 0.94^m в зависимости от высоты объекта. После учета красной утечки тренд кривой блеска исчез (см. рис. 10), что может говорить о правильности коррекции.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассмотрено проявление эффекта «красной утечки» коротковолновых фильтров U и B при фотометрических наблюдениях с ПЗС-камерой телескопа RC600 КГО ГАИШ. Наличие пропускания вне рабочей полосы фильтров приводит к значительному вкладу этого эффекта — до $0.6 - 0.8^m$ для нормальных звезд поздних спектральных классов. Для звезд ранних спектральных классов эффект мал для полосы B , но может быть замечен в полосе U , где на уровне нескольких процентов замечен начиная с A0-звезд.

Из рис. 2 видно, что красная утечка в полосе U по разному проявляется для звезд, имеющих одинаковые показатели цвета, но принадлежащих к разным классам светимости. В полосе B такого разделения не наблюдается. Такое отличие может быть связано с формой кривых пропускания фильтров вне рабочей полосы — у фильтра U часть сигнала красной утечки собирается в узком пике пропускания в области 700 нм, тогда как в полосе B весь паразитный сигнал собирается в ИК-области спектра (см. рис. 1). При обработке фотометрических наблюдений и отборе звезд сравнения мы обычно имеем дело только с показателями цвета, не обращая внимание ни на реальный спектральный класс, ни на класс светимости звезд сравнения, которые используются при фотометрии. Однако при работе в полосе U это может привести к значительным ошибкам при коррекции влияния красной утечки фильтра (величина эффекта отличается в 2 раза для звезд разных классов светимости).

На вклад красной утечки в итоговый блеск системы оказывают влияние несколько эффектов, меняющих отношение потоков в коротковолновых полосах относительно длинноволновых. Это может быть межзвездное покраснение, которое приводит к ослаблению объекта в полосах U и B и резко увеличивает вклад красной утечки, который для нормальных звезд при $E(B - V) = 1$ может достигать 2^m , т.е. паразитный сигнал в несколько раз превышает полезный (см. рис. 3 и 4).

Зависимость величины «красной утечки» в полосах U и B от межзвездного покраснения объясняется сильным падением потока излучения в ра-

бочей области пропускания коротковолновых светофильтров относительно потока в полосах V , R и I из-за действия поглощения. Например, для нормального закона межзвездного покраснения при $E(B - V) = 1$ в полосе U поглощение будет на 2^m больше, чем в полосе R , откуда собирается большая часть сигнала утечки. Поэтому абсолютная величина утечки станет меньше (т.к. в красной области тоже есть поглощение, пусть и меньшее по величине), при значительном росте ее относительного вклада.

На величину «красной утечки» влияет также поглощение излучения в земной атмосфере. В работе проведена синтетическая фотометрия для нескольких характерных значений факторов, создающих это поглощение, — изменение содержания водяного пара PWV и изменение воздушной массы M_z . Первый фактор практически не влияет на величину эффекта в полосе U , но замечен в полосе B . Второй фактор сильнее сказывается в полосе U . Влияние воздушной массы подтверждается наблюдениями красной переменной SU Lyn (спектральный класс M5III) — наблюдаемый эффект находится в хорошем согласии с модельным (рис. 10).

В работе предложены методики учета красной утечки для звезд, спектр которых близок к спектру нормальных звезд или отличается в голубой области. В первом случае учет можно проводить напрямую, используя данные рис. 2–8. Во втором случае алгоритм коррекции сложнее, и описан в разделе «Фотометрический мониторинг».

В работе представлены результаты поиска быстрой переменности у двух объектов — известной пекулярной симбиотической звезды CN Cyg и недавно открытой симбиотической звезды SU Lyn. У SU Lyn фликкер-эффект обнаружен не был. При учете красной утечки тренд на её кривой блеска исчез, что подтверждает правильность коррекции. Важность учета красной утечки также подтверждают наблюдения фликкер-эффекта у CN Cyg. Амплитуда является важным параметром, характеризующим быструю переменность блеска. После исправления красной утечки она увеличилась и составила 0.10^m 06.11.2019 и 0.19^m 15.12.2022. После коррекции блеск звезды стал меньше: 06.11.2019 в полосе B уменьшение яркости составило $\sim 0.4^m$, а 15.12.2022 блеск упал на $\sim 0.2^m$. Разная величина поправки (при практически неизменном спектральном классе холодного компонента) связана с разным вкладом в общий блеск системы аккреционного диска в эти даты. Интересно также отметить тот факт, что несмотря на более поздний спектральный класс холодного компонента CN Cyg по сравнению с SU Lyn, поправка для нее оказывается меньше. Это связано с наличием у CN Cyg дополнительного излучения в коротковолновой области, отсутствующего у SU Lyn.

Работа выполнялась с использованием оборудования, приобретенного по Программе развития МГУ имени М. В. Ломоносова. Работа А. М. Татарникова (анализ результатов наблюдений и синтетической

фотометрии) поддержана Российским научным фондом (грант № 23-12-00092). Н. А. Масленникова (наблюдения симбиотических звезд, обработка на-

блюдений быстрой переменности) благодарит за поддержку Фонд развития теоретической физики и математики «БАЗИС» (грант № 22-2-10-21-1).

- [1] Боярчук А.А. // *Астрономический журнал*. **44**, 1016. (1967).
- [2] Bath, G.T. and Pringle J.E. // *MNRAS*. **201**, 345. (1982).
- [3] Kafatos M. and Michalitsianos A.G. // *NASA Conference Publication*. **2238**, 452. (1982).
- [4] Viotti R., Altamore A., Baratta G.B. et al. // *NASA Conference Publication*. **2238**, 446. (1982).
- [5] Bollimpalli D.A., Hameury J.M., Lasota J.P. // *MNRAS*. **481**, 5422. (2018).
- [6] Bruch A. // *A&A*. **359**, 998. (2000).
- [7] Formigginì L., Leibowitz E.M. // *MNRAS*. **396**, 1507. (2009).
- [8] Sokolowski J.L., Bildsten L. // *ApJ*. **517**, 919. (1999).
- [9] Stoyanov K.A., Marti J., Zamanov R. et al. // *Bulgarian Astronomical Journal*. **28**, 42. (2018).
- [10] Dobrotka A., Hric L., Casares J. et al. // *MNRAS*. **402**, 2567. (2010).
- [11] Maslennikova N.A., Tatarnikova A.A., Tatarnikov A.M., Ikonnikova N.P. and Dodin A.V. // *Astron. Lett.* **48**, 38. (2022).
- [12] Munari U. and Moretti S. // *Baltic Astronomy*. **21**, 22. (2012).
- [13] Shatsky N., Belinski A., Dodin A. et al. // *Ground-Based Astronomy in Russia. Proc.* **1**. 127. (2020).
- [14] Berdnikov L.N., Belinski A.A., Shatskii N.I. et al. // *Astr. Rep.* **64**, 310. (2020).
- [15] Ilkiewicz K., Mikolajewska J., Scaringi S. et al. // *MNRAS*. **510**, 2707. (2022).
- [16] Noll S., Kausch W., Barden M. et al. // *A&A*. **543**, A92. (2012).
- [17] Pickles A.J. // *PASP*. **110**, 863. (1998).
- [18] Maslennikova N.A., Tatarnikov A.M., Tatarnikova A.A. // *Astr. Bull.* **78**, 325. (2023).
- [19] Shenavrin V.I., Taranova O.G. and Nadzhip A.E. // *Astr. Rep.* **55**, 31. (2011).
- [20] Green G.M., Schlafly E., Zucker C. et al. // *ApJ*. **887**, 93. (2019).
- [21] Kloppenborg B.K. // Observations from the AAVSO International Database. <https://www.aavso.org>
- [22] Hinkle K.H., Fekel F.C., Joyce R.R. // *ApJ*. **692**, 1360. (2009).
- [23] Tarasova T.N., Skopal A. // *Astr. Lett.* **47**, 235. (2021).
- [24] Mukai K., Luna G.J.M., Cusumano G. et al. // *MNRAS*. **461**, L1. (2016).

On the impact of «red leak» of filters on brightness estimates of late stars using the example of observations of rapid variability of symbiotic stars

G. E. Nikishev¹, N. A. Maslennikova^{1,a}, A. M. Tatarnikov¹, K. Yu. Parusov¹, A. A. Belinski²

¹Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University. Moscow 119991, Russia

²Sternberg Astronomical Institute, Moscow State University. Moscow 119234, Russia

E-mail: ^amaslennikova.na16@physics.msu.ru

The results of modeling the dependence of the «red leak» of photometric filters on various factors (color index $V - R$, luminosity class, interstellar reddening, air mass and PWV) during observations of stars are presented. The error arising from not taking into account the «red leak» in the case of filters used on the 0.6-m telescope of the CMO SAI can amount to $0.6^m - 0.8^m$ for late stars. Algorithms for reducing observational data are presented for filters U and B . The results of observations of the rapid variability of two symbiotic stars CH Cyg and SU Lyn with cold components of very late spectral types are presented. For CH Cyg, rapid variability was detected on both observation dates. Taking into account the «red leak» effect, the amplitude in the B band was 0.10^m on November 6, 2019 and 0.19^m on December 15, 2022, with a characteristic variability time of about 20 minutes. For SU Lyn, no rapid brightness variability was detected in the B band on February 2, 2023 (with an accuracy of 0.003^m)

PACS: 95.75.De, 95.85.Kr.

Keywords: photometry, photometric systems, symbiotic stars.

Received 22 September 2023.

English version: *Moscow University Physics Bulletin*. 2023. **78**, No. 6. Pp. 854–862.

Сведения об авторах

1. Никишёв Георгий Эдуардович — студент 4 курса; тел.: (495) 939-16-61.
2. Масленникова Наталия Андреевна — аспирантка 2 года обучения; e-mail: maslennikova.na16@physics.msu.ru.
3. Татарников Андрей Михайлович — канд. физ.-мат. наук, доцент, ст. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-16-61, e-mail: andrew@sai.msu.ru.
4. Парусов Кирилл Юрьевич — студент 4 курса; тел.: (495) 939-16-61.
5. Белинский Александр Александрович — канд. физ.-мат. наук, зам. директора ГАИШ МГУ; тел.: (495) 939-23-83.