

УДК 524.338:520.84

**БАЛЬМЕРОВСКИЕ ДЕКРЕМЕНТЫ КАРЛИКОВЫХ НОВЫХ ЗВЁЗД**

© 2017 Н. Ф. Войханская\*

*Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия*

Поступила в редакцию 19 января 2017 года; принята в печать 31 января 2017 года

Изучается вопрос о возможной переменности условий в карликовых новых. В качестве индикатора переменности используются бальмеровские декременты, форма которых сильно зависит от условий в излучающей среде. Показано, что в минимуме блеска декременты, как правило, аномальные и переменные во времени, что говорит о переменности условий в излучающей среде. При переходе во вспышечное состояние спектр сильно меняется, декремент становится крутым, в нем нет никаких аномалий. Похоже, что вспышка делает светящуюся область более однородной и разреженной. Или, возможно, это светит какая-то другая область, излучение которой не видно в минимуме блеска.

Ключевые слова: *звезды: карликовые новые*

**1. ВВЕДЕНИЕ**

Использование бальмеровских декрементов дает один из эффективных методов диагностики газа, излучающего эмиссионные линии. Форма декремента довольно сложным образом зависит от физических условий в излучающей среде, а диапазон его изменений широк: от очень крутых при низких плотностях излучения и вещества до пологих и инверсных при высоких плотностях излучения и вещества. Последние называются аномальными, т.к. указывают на аномальное (небольцмановское) заселение энергетических уровней атомов. Появление аномальных декрементов указывает на неоднородность излучающей среды, на то, что в ней существуют области с разными физическими условиями, между которыми происходит радиационное взаимодействие в спектральных линиях [1].

Карликовые новые (DNe-системы) являются подгруппой катаклизмических переменных (CVe). DNe, как и все CVe, представляют собой тесные двойные системы, состоящие из белого и красного карликов. Предполагается, что последний заполняет свою часть внутренней полости Роша и от него вещество перетекает в полость белого карлика через окрестности внутренней точки Лагранжа. Там оно, двигаясь по спирали, приближается к белому карлику и аккрецирует на него. Возникающая плоская спиралевидная структура называется аккреционным диском. Время от времени у DNe происходят вспышки блеска амплитудой 4–6 величин. Причиной их считается возрастание темпа аккреции на белый карлик вследствие усиления потока вещества от красного карлика или из-за

возникновения неустойчивостей в аккреционном диске. Средняя энергия вспышек  $10^{34}$ – $10^{35}$  эрг, продолжительность — несколько дней, а интервал между ними — от нескольких дней до сотен дней.

Мы рассматриваем спектры карликовых новых и сравниваем бальмеровские декременты в спокойном состоянии DNe-систем и во вспышке, т.е. в минимуме и максимуме блеска. В работе не приводятся результаты изучения всех систем и их вспышек, которые были получены, а только примеры, которые характеризуют общую тенденцию изменений.

Бальмеровские линии маркировались, как это принято, по номеру верхнего уровня, с которого возникает линия, поэтому  $H\alpha$  — это  $H_3$ ,  $H\beta$  —  $H_4$  и т.д. Далее мы будем опускать слово бальмеровский, т.к. другие не рассматривались.

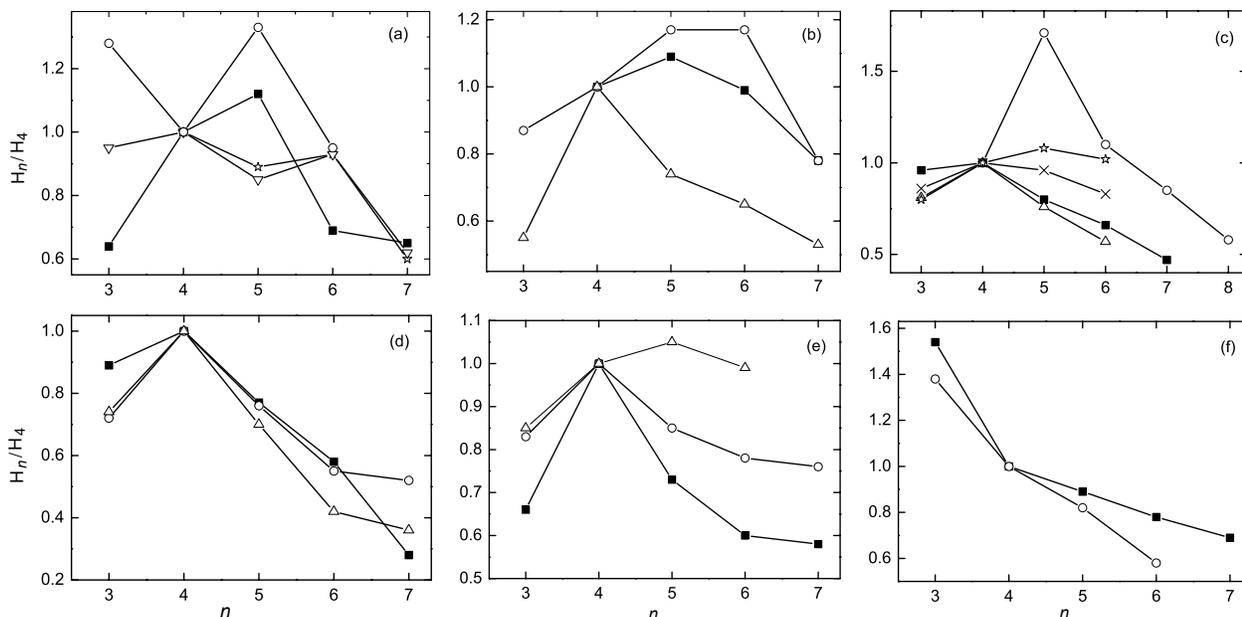
**2. МИНИМУМ БЛЕСКА**

Средний спектр катаклизмической переменной в минимуме блеска показан на рис. 1. Он заимствован из каталога [2, 3] и получен усреднением спектров систем, уверенно отнесенных к CVe. Исправление за покраснение не делалось, и веса усредняемых спектров принимались одинаковыми.

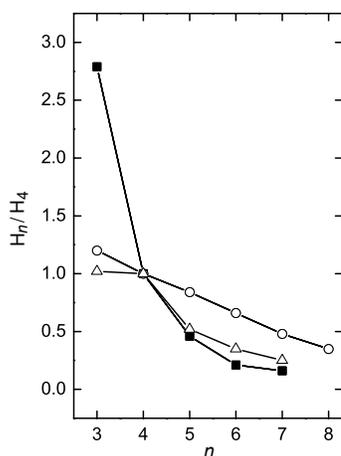
Спектры DNe-систем очень похожи на рис. 1, но в них более слабые линии нейтрального гелия, а линия  $He\ II\ 4686\ \text{\AA}$ , как правило, видна только во вспышке. Континуум возрастает в коротковолновую сторону, бальмеровский скачок в эмиссии. У некоторых систем бывают заметны элементы спектра вторичного компонента — карлика позднего спектрального класса (G, K, M). Спектры одной

\*E-mail: [vojn@sao.ru](mailto:vojn@sao.ru)





**Рис. 2.** Примеры балмеровских декрементов и их переменности в минимуме блеска: HL CMa (a, b); SS Cyg (c); EX Hya (d); TW Vir (e); пример крутого декремента HT Cas (f). Подробности в тексте.



**Рис. 3.** Типичный декремент газовой туманности (квадраты) и усредненные декременты DNe-систем в минимуме блеска (кружки) и в максимуме блеска (треугольники).

Изменение вида декремента с фазой орбитального периода изучено мало. В работе [8] на примере SS Cyg показано, что такой зависимости нет. Аналогичный вывод можно сделать по результатам работы [7]. Подобное утверждение встречается в более старых работах относительно RX And. Отмечается также, что декремент «довольно плоский». Неизменность формы декремента в течение орбитального периода, возможно, объясняется тем, что спектры, соответствующие разным фазам, получены в разные периоды, и зависимость может быть завуалирована непрерывно меняющимися услови-

ями в оболочке. В течение одного периода различия, возможно, будут заметны.

Еще меньше изучен вопрос об изменении декремента со временем между вспышками (после окончания одной вспышки и до начала следующей). Только в работе [8] есть указание на то, что декремент начинает меняться за 2–3 дня до начала подъема блеска, когда еще ни по блеску, ни по цвету нельзя сказать, что начинается вспышка. Изменения тем заметнее, чем круче будет восходящая ветвь будущей вспышки. Иногда на нисходящей ветви вспышки наблюдалась остановка в понижении блеска (назовем ее «послевспышкой»). В момент её начала инверсия декремента исчезала. По-видимому, вид декремента непосредственно связан с процессом энерговыделения. Поэтому в работе [8] рекомендовалось использовать декремент для надежного прогнозирования появления вспышек. Заметное изменение декремента до наступления вспышки можно увидеть в результатах наблюдений SS Cyg в работе Кларка и др. [9]. Авторы назвали этот интервал времени «линейным подъемом» (a linear increase). За первые 2–3 дня блеск возрос примерно на 3% от максимального блеска, в следующие 2 дня — ещё примерно на 10% от максимума. А в последующие два дня начался быстрый подъем блеска, и система достигла максимума. Но именно в начальные 3–5 дней декремент сильно менялся. Об этом будет сказано в следующем разделе.

### 3. МАКСИМУМ БЛЕСКА

Квазипериодические вспышки блеска — характерная особенность DNe-систем. На долговременных кривых блеска хорошо заметно, что форма вспышек довольно разнообразна: различна их продолжительность, крутизна восходящей и нисходящей ветвей, форма максимума. У некоторых DNe вспышки подразделяются на длинные (L) и короткие (S) по длительности фазы максимального блеска.

С началом вспышки спектр заметно меняется: по мере возрастания блеска эмиссионные линии ослабевают и возникают эмиссионно-абсорбционные линии (широкие абсорбции с эмиссией в центре). Во время подъема блеска эмиссии могут ненадолго исчезнуть, но затем они появляются вновь, обычно уже в максимуме блеска. Их интенсивность увеличивается и к концу вспышки вид спектра восстанавливается. Линия He II 4686 Å изменяется иначе: в минимуме блеска она очень слаба, а чаще отсутствует. Во вспышке она появляется, ее интенсивность растет с увеличением блеска, достигая максимума в максимуме вспышки. С началом понижения блеска ее интенсивность быстро убывает, и она может исчезнуть до достижения минимума блеска.

Характеристики линии He II 4686 Å не удалось связать ни с одной характеристикой вспышки. Внимательный просмотр большого количества вспышечных спектров показал, что эта линия сильна в спектрах высокого возбуждения, в которых хорошо видны эмиссии нейтрального гелия и некоторые линии He II. В спектрах низкого возбуждения линия 4686 Å очень слаба или отсутствует. Из атласа [4] мы отобрали две группы объектов, в спектрах которых достаточно сильна линия He I 4471 Å, но в первой группе она в эмиссии, а во второй — в абсорбции. Далее сравнили эквивалентные ширины  $W$  линии 4686 Å в этих группах. В первой группе величина  $W$  была в пределах от 4 до 20 Å, а во второй всегда была меньше 1 Å. Средние величины  $W$  в группах различались почти в 30 раз. Фазы вспышек, в которых наблюдались обе группы объектов, были примерно одинаковы, и это не может быть причиной разной степени возбуждения. Причину, вероятно, надо искать в количестве коротковолнового излучения, возбуждающего оболочку.

Изменение спектра происходит по-разному при разных вспышках [8]. При крутой восходящей ветви спектр изменяется быстро, из-за чего фаза абсорбционных линий скоротечна. При медленном возрастании блеска (такие вспышки называют аномальными) спектр изменяется медленно, и абсорбционные линии могут даже не появиться.

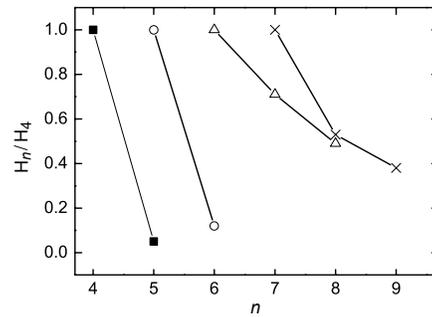


Рис. 4. Примеры бальмеровских декрементов в максимуме блеска. Слева направо: HX Peg, SY Cnc, YZ Cnc, VZ Cnc. Каждый последующий сдвинут относительно предыдущего по оси абсцисс на 1.

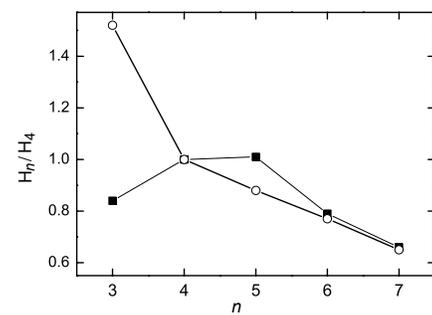


Рис. 5. Бальмеровский декремент RX And в минимуме блеска (квадраты) — типичный аномальный декремент, и в максимуме блеска (кружки).

Мы построили более 40 декрементов разных объектов в разных фазах вспышек. На рис. 4 показано четыре типичных декремента в максимуме блеска. Слева направо каждый последующий сдвинут относительно предыдущего по оси абсцисс на 1. На всех ордината 1 соответствует линии H<sub>4</sub>. Мы ограничились этим количеством примеров, потому что все декременты однотипны. Замечательно, что все они довольно крутые (круче, чем в минимуме блеска) и в них не видно никаких аномалий. Т.е. вспышка делает светящуюся область более однородной и разреженной. Или, возможно, это светит какая-то другая область, свечение которой мы не видим в минимуме блеска. Сведения о линии H<sub>3</sub>, к сожалению, очень скудны. Она изменяется так же, как другие бальмеровские линии. Но если она является чистой абсорбцией (без эмиссии в центре), то у всех остальных водородных линий эмиссии в центре не будет. Следует еще отметить, что изменение декремента происходит по-разному (в разное время) у разных вспышек. Связано ли это с особенностями конкретных систем, сказать трудно.

Рассмотрим некоторые примеры подробнее.

*RX And.* На рис. 5 показаны два декремент-та. Один из них (квадраты) соответствует самому началу большой вспышки в августе–сентябре 1982 г. [10]. Второй (кружки) получен усреднением двух декрементов: в середине максимума той же вспышки [10] и вспышки в ноябре 2000 г. [4]. Разница между ними хорошо заметна: первый мало отличается от декрементов в минимуме блеска, второй гораздо круче.

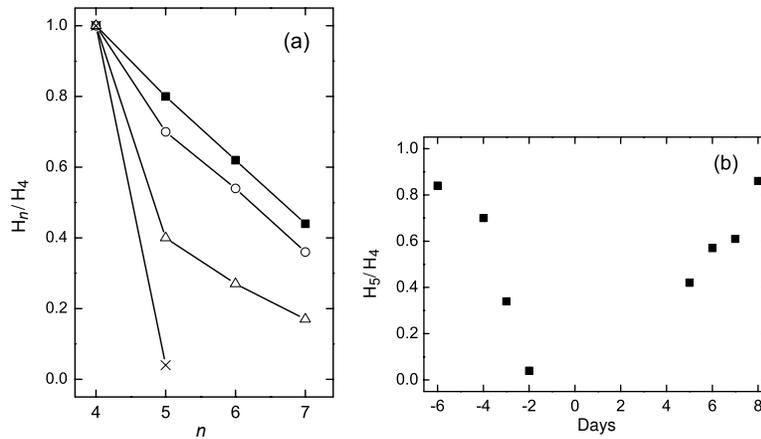
*SS Cyg.* В работе [9] проведено наблюдение системы в течение одного полного вспышечного цикла. Анализируются изменение потока в континууме и эмиссионных линиях, полуширин линий и величин абсорбций. Изменение декремента показано на рис. 6. По мере подъема блеска (рис. 6а) декремент становится все более крутым. При понижении блеска картина обратная. На рис. 6б показано изменение отношения линий  $H_5/H_4$ . По оси абсцисс указано количество дней до максимума блеска (отрицательные числа) и после максимума (положительные числа). Хорошо видно, как меняется это отношение при приближении к началу подъема блеска. И хотя декременты относятся к самому началу вспышки, видно, что восходящая и нисходящая ветви вспышек различаются при одинаковом блеске. Ранее это отмечалось в [8] по результатам исследования четырех вспышек. При быстром изменении блеска (вторая стадия по терминологии [9]) эмиссионные линии слабы и сильно зашумлены, поэтому измерить их трудно.

*IP Peg.* Эта затменная система замечательна тем, что во вспышке у нее очень сильный эмиссионный спектр и самая сильная линия в нем  $\lambda 4686 \text{ \AA}$  He II. Она в 1.5–2 раза сильнее линии  $H\beta$ . Система вспышкивает каждые три месяца, поэтому ее вспышки наблюдались неоднократно. Средний спектр в минимуме блеска, полученный в октябре 1985 г. [11], содержит сильные раздвоенные линии H, He I и Fe II, а линия He II отсутствует. На орбитальной кривой блеска в континууме перед началом глубокого (почти полного) затмения наблюдается сильный горб, что похоже на предзатменный горб U Gem. Во вспышке горб исчезает, но затмение остается таким же глубоким, что не похоже на U Gem. Большинство наблюдений этой системы проведено во время вспышек блеска. Во вспышечных спектрах не видно характерных для DNe-систем широких абсорбционно-эмиссионных линий. Вероятно, это объясняется тем, что пока не получены спектры на восходящих ветвях вспышек. Полученные в разное время спектры при общей схожести сильно различаются в деталях: профилими линий, их интенсивностью, даже если получены в одинаковых фазах вспышки. Является ли такая переменность особенностью системы или обусловлена разнообразием вспышек пока не ясно, т.к. свойства системы в минимуме блеска недостаточно

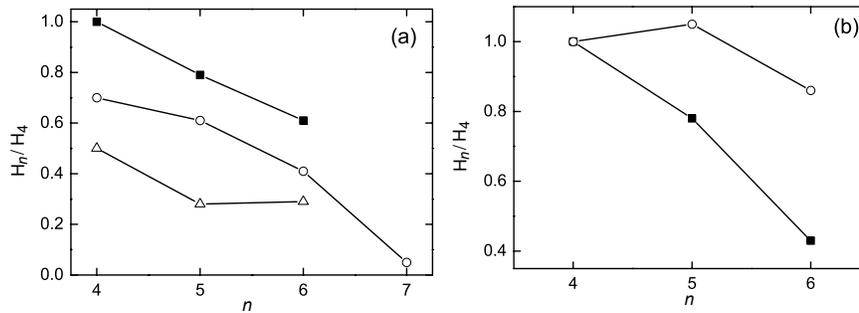
изучены. Из-за большой переменности линейчатого спектра и малого участка спектра, который обычно регистрируется, мы вынуждены строить (и приводить) усредненные декременты.

На рис. 7а показаны: декремент в минимуме блеска (квадраты); декремент во вспышке в августе 2002 г. (кружки), когда блеск почти достиг максимума [12] и декремент в яркой вспышке 1987 г. (треугольники) [13, 14]. Наблюдения в [12] охватывают фазу затмения  $(0.0 \pm 0.1)P$ , где  $P$  — орбитальный период. Вспышка 1987 г. наблюдалась дважды: когда блеск только достиг максимума и в конце, перед началом понижения блеска [13, 14]. На рис. 7б приведены два декремента во вспышке в августе 1994 г. Наблюдения были проведены в середине плоского продолжительного максимума блеска [15]. Спектры в разных фазах орбитального периода заметно различаются и декременты тоже. Декременты в интервале фаз  $(0.0–0.5)P$  оказалось возможным усреднить (квадраты), а декремент в фазе  $0.75P$  (кружки) очень отличается от первых трех, поэтому приводится отдельно.

Декременты на рис. 7а довольно похожи между собой, и заметного различия между вспышкой и минимумом блеска нет. Нижний декремент (квадраты) на рис. 7б похож на приведенные на рис. 7а. А вот верхний декремент (кружки) больше похож на декременты DNe-систем в минимуме блеска (см. рис. 2). Все это указывает на то, что вспышка IP Peg, возможно, представляет собой некий асимметричный процесс и отражает, вероятно, какие-то изменения, происходящие в окрестностях главного компонента. Обращает на себя внимание также то, что вспышечные декременты совсем не похожи на те, что приведены на рис. 4. Может быть, во время вспышки происходит выброс вещества из более внутренних и горячих областей диска. Это могло бы объяснить появление во вспышке сильнейшего эмиссионного спектра высокого возбуждения. Все авторы, изучавшие эту систему, отмечают ее сложность, обусловленную большим количеством источников спектра как линейчатого, так и непрерывного. Отмечались вспышки блеска диска в линиях водорода и He II  $\lambda 4686 \text{ \AA}$ , существование устойчивой спиралевидной структуры, которая горячее окружающего диска. Предполагалось существование мощного оттекающего дискового ветра и некругового движения во внешнем диске [15–17]. В [18] показано, что аккреционный диск «излучает явно асимметрично». Одним словом, система сложная, пока непонятная и непохожая на другие DNe-системы. Это же показывает метод декрементов. Линия He II  $\lambda 4686 \text{ \AA}$  изменяется в этой системе иначе, чем в других DNe. С началом подъема блеска ее интенсивность быстро растет, что обычно для DNe-систем. В максимуме блеска она



**Рис. 6.** SS Cyg: увеличение крутизны декремента по мере подъема блеска (а); изменение отношения интенсивностей линий  $H_5/H_4$  в течение вспышки (b), по оси абсцисс указаны дни до максимума вспышки (отрицательные числа) и после максимума вспышки (положительные числа).



**Рис. 7.** Бальмеровские декременты очень переменной системы IP Peg. (а) сверху вниз: декременты в минимуме блеска (квадраты), во вспышке в августе 2002 г. (кружки) и во вспышке 1987 г. (треугольники). Последние два сдвинуты по оси ординат на 0.3 и 0.5 соответственно. (b) декремент во вспышке в августе 1994 г. в интервале орбитальных фаз 0.0–0.5 (квадраты) и 0.75 (кружки). Подробности в тексте.

в 1.5–2 раза сильнее линии  $H\beta$ . При понижении блеска до минимального уровня ее интенсивность составляет примерно 0.5 и более интенсивности  $H\beta$  [16], что совсем непохоже на DNe-системы, в которых она исчезает раньше, чем блеск достигнет минимальной величины. По-видимому, в течение минимума она постепенно исчезнет. Интересно было бы выяснить, за какое время она полностью исчезнет в спектре. Это будет временем полной релаксации условий в системе. Усредненный декремент DNe-систем в максимуме блеска показан на рис. 3 (треугольники).

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Целью настоящей работы было выявить и рассмотреть возможную переменность условий в излучающей среде при изменении блеска DNe-систем. В качестве индикатора переменности использовалась форма бальмеровского декремента. Она прямо связана с условиями в излучающей

среде и может меняться от очень крутой при низких плотностях излучения и вещества до пологой и частично инверсной при высоких плотностях излучения и вещества. Мы построили более 80 декрементов различных систем, когда они находились в минимуме блеска. Подавляющее большинство их оказалось аномальными, что указывает на неоднородность излучающей среды. Для некоторых систем удалось построить несколько декрементов по разновременным наблюдениям. Они всегда различались, и иногда очень сильно, даже на коротком интервале времени. Это говорит не только о неоднородности излучающей среды, но и о переменности самих неоднородностей. Есть примеры небольшой переменности декрементов. Будущие наблюдения покажут, являются ли эти системы стабильными или их просто мало наблюдали.

Построено более 40 бальмеровских декрементов разных систем, когда они были в разных фазах вспышек. Замечательно, что все они оказались до-

вольно крутыми (круче, чем в минимуме блеска) и в них нет никаких аномалий. Возможно, что вспышка делает светящуюся область более однородной и разреженной. Но возможно, что светит какая-то другая область, свечения которой мы не видим в минимуме блеска. Судя по изменению декремента в течение вспышечного цикла, которое описано выше, вторая версия нам кажется предпочтительней. В пользу этого предположения можно указать на следующее обстоятельство: некоторые системы изредка наблюдались в очень глубоком минимуме, когда их блеск был на  $1^m-1^{m5}$  ниже среднего блеска между вспышками. В таких случаях линия  $H\alpha$  всегда была несколько сильнее, чем обычно.

Несмотря на многие общие свойства карликовых новых среди них есть исключение, возможно, не одно. Пример тому — система IP Peg, декременты которой во вспышке изменяются иначе чем у других представителей этой группы. Эту систему для начала желательнее хорошо изучить в минимуме блеска. Переход карликовых новых от минимума блеска к максимуму мы рассмотрим в другой работе.

#### БЛАГОДАРНОСТИ

Автор благодарит Юшкина М. В. за помощь в оформлении работы.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. V. P. Grinin, *Izvestiya Ordena Trudovogo Krasnogo Znameni Krymskoj Astrofizicheskoj Observatorii* **62**, 54 (1980).

2. T. Zwitter and U. Munari, *Astron. and Astrophys. Suppl.* **107**, 503 (1994); **114**, 575 (1995); **117**, 449 (1996); U. Munari and T. Zwitter, *Astron. and Astrophys. Suppl.* **128**, 277 (1998).
3. U. Munari, T. Zwitter, and A. Bragaglia, *Astron. and Astrophys. Suppl.* **122**, 495 (1997).
4. L. Morales-Rueda and T. R. Marsh, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **332**, 814 (2002).
5. H. A. Sheets, J. R. Thorstensen, C. J. Peters, et al., *Publ. Astron. Soc. Pacific* **119**, 494 (2007).
6. G. Williams, *Astrophys. J. Suppl.* **53**, 523 (1983).
7. I. G. Martinez-Pais, F. Giovannelli, C. Rossi, and S. Gaudenzi, *Astron. and Astrophys.* **291**, 455 (1994).
8. N. F. Vojkhanskaja, *Astrofizicheskie Issledovaniia* **9**, 16 (1977).
9. J. T. Clarke, S. Bowyer, and D. Capel, *Astrophys. J.* **287**, 845 (1984).
10. J. T. Clarke and S. Bowyer, *Astron. and Astrophys.* **140**, 345 (1984).
11. T. R. Marsh, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **231**, 1117 (1988).
12. R. Ishioka, S. Mineshige, T. Kato, et al., *Publ. Astron. Soc. Japan* **56**, 481 (2004).
13. T. R. Marsh and K. Horne, *Astrophys. J.* **349**, 593 (1990).
14. F. Piche and P. Szkody, *Astron. J.* **98**, 2225 (1989).
15. L. Morales-Rueda, T. R. Marsh, and I. Billington, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **313**, 454 (2000).
16. F. V. Hessman, *Astron. J.* **98**, 675 (1989).
17. R. Baptista, C. A. Haswell, and G. Thomas, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **334**, 198 (2002).
18. D. Steeghs, K. Horne, T. R. Marsh, and J. F. Donati, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **281**, 626 (1996).

### Balmer Decrements in Dwarf Novae

N. F. Vojkhanskaja

We investigate the question of the possible variable conditions in dwarf novae. The Balmer decrements are used as variability indicators due to their form being strongly dependent on the conditions in the radiating medium. It is shown that the decrements are usually anomalous and variable in time at minimum light, which indicates a variability of the conditions in the radiating medium. The spectrum changes significantly during the outburst state, the decrement becomes steep and has no anomalies. It appears that the outburst makes the emitting region more homogeneous and sparse. Another possible explanation is that the radiation is emitted by some other region, unseen at minimum light.

Keywords: stars: dwarf novae