

DOI: 10.54503/0571-7132-2024.67.4-469

## КОЛИЧЕСТВЕННЫЙ АНАЛИЗ СПЕКТРОВ ЗВЕЗД CQ Tau И UX Ori ВНЕ ЗАТМЕНИЙ ПО ДАННЫМ NORDIC OPTICAL TELESCOPE

П.ДИМИТРИЕВА<sup>1</sup>, О.В.КОЗЛОВА<sup>2</sup>

Поступила 20 августа 2024

Принята к печати 6 декабря 2024

Выполнен количественный анализ спектров звезд CQ Tau и UX Ori, принадлежащих семейству молодых неправильных переменных звезд с алголеподобными ослаблениями блеска. Спектры получены в обсерватории Nordic Optical Telescope (NOT) в моменты времени, когда обе звезды находились в ярком состоянии. На их основе определены эквивалентные ширины фотосферных линий поглощения и эмиссионной линии  $H\alpha$ . По эквивалентной ширине эмиссионной линии сделаны оценки темпа аккреции газа на звезды.

Ключевые слова: *переменные звезды: спектры: CQ Tau, UX Ori*

1. *Введение.* Звезды типа UX Ori - это молодые звезды преимущественно спектральных классов A-F, демонстрирующие глубокие ( $\Delta V = 2 - 3^m$ ) непериодические ослабления блеска продолжительностью от нескольких дней до нескольких недель. К числу их важных наблюдательных особенностей относится необычное поведение цветовых треков на диаграммах цвет-величина. Впервые этот эффект наблюдали в 1968г. Гетц и Венцель [1] во время минимумов CQ Tau. Падение блеска звезды вначале сопровождалось покраснением, однако вблизи минимума цветовой трек поворачивал в голубую сторону. Вскоре "эффект поголубения" был обнаружен у других звезд этого типа. Первоначально этот эффект объясняли усилением вклада эмиссионного спектра звезд при ослаблениях блеска (см., например, [2,3]). Позже выяснилось, что его происхождение связано с усилением вклада рассеянного излучения околозвездных дисков. Доказательства этого были получены в ходе много-летнего фотополяриметрического мониторинга звезд этого семейства [4]. У всех исследованных звезд наблюдалась высокая линейная поляризация в минимумах блеска, достигающая 5-8%. На основании этого в цитированной выше работе было высказано предположение, что околозвездные диски звезд типа UX Ori наклонены под небольшим углом к лучу зрения, что и является главной причиной их сильной переменности. Это предположение в целом подтвердилось при интерферометрических наблюдениях околозвездных дисков

(см., например, [5]).

В данной работе представлены результаты количественного анализа спектров двух звезд типа UX Ori: CQ Tau и самой UX Ori, полученных в статье [6]. Спектры получены с помощью эшелювого спектрографа на 2.56-м телескопе обсерватории NOT (Nordic Optical Telescope) с высоким спектральным разрешением ( $R=25000$ ). Спектральные наблюдения сопровождались фотометрическими наблюдениями в Крымской астрофизической обсерватории, которые показали, что обе звезды находились в ярком состоянии блеска (вне затмений).

В табл.1 приведены параметры звезд UX Ori и CQ Tau согласно данным Ростопчиной [7]. Заметим, что в ее работе для этой цели использовались самые яркие состояния звезд типа UX Ori, в которых влияние переменной околозвездной экстинкции на распределение энергии в спектре звезд минимально, что очень важно при изучении звезд этого семейства. Мы скорректировали результаты ее работы для UX Ori с учетом данных о расстоянии до этой звезды по наблюдениям GAIA [8].

Таблица 1

ПАРАМЕТРЫ НАБЛЮДАЕМЫХ ЗВЕЗД

| Звезда | Sp    | $d$ (пк) | $M$ ( $M_{\odot}$ ) | Возраст ( $10^6$ г.) | $R$ ( $R_{\odot}$ ) | $\Delta V$ | $v \sin i$ (км/с) |
|--------|-------|----------|---------------------|----------------------|---------------------|------------|-------------------|
| UX Ori | A3III | 325      | 1.9                 | 4                    | 1.9                 | 3.9        | 140               |
| CQ Tau | F2IV  | 140      | 1.5                 | 10                   | 1.9                 | 2.2        | 90                |

Комментарий: Расстояние для UX Ori взято из статьи [8], скорости для UX Ori и CQ Tau из статьи [6], остальные параметры из статьи [7].

**2. Общее описание спектров.** В оптических спектрах исследуемых звезд присутствуют многочисленные линии поглощения нейтральных и ионизованных металлов (рис.1-6), а также эмиссионные линии водорода Бальмеровской и Пашеновской серий. Большинство фотосферных линий типичны для нормальных звезд близких спектральных классов, но такие как HeI 5876, NaI D или триплет OI 7774, не наблюдаются с такой же интенсивностью у нормальных A-звезд. Многие фотосферные линии блендированы околозвездными линиями поглощения, так называемыми shell компонентами. Как показал наш анализ, наиболее стабильными оказались линии MgII 4481 и SiII 6347.

В резонансных линиях NaI наблюдаются спектральные компоненты поглощения, смещенные в красную сторону. Эти компоненты могут появляться и исчезать в течение нескольких дней, указывая на падение газовых сгустков на звезду. Похожая картина падения вещества наблюдается в спектре

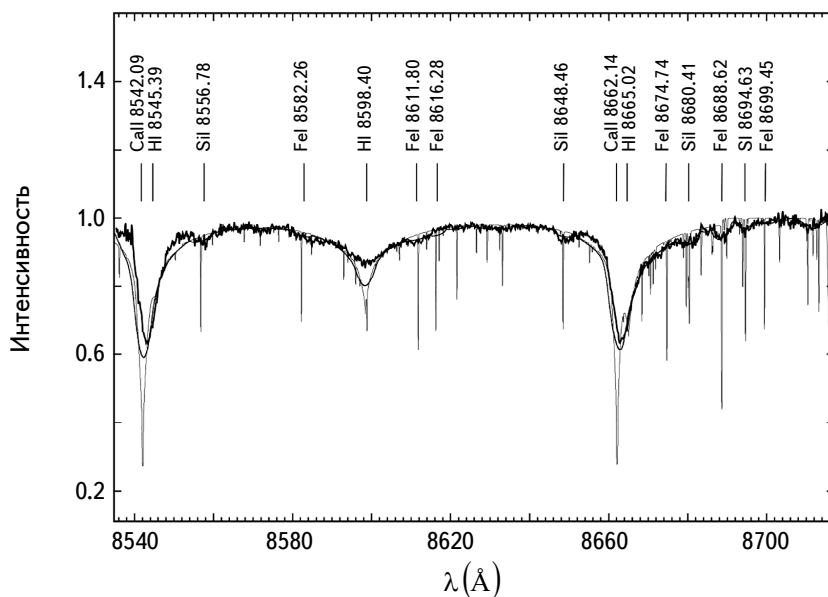


Рис.1. Участок спектра CQ Тау, соответствующий 26 порядку эшелювого спектра звезды. Спектр получен суммированием трех спектров, наблюдавшихся в течение трех ночей 1996г., когда звезда имела максимальный блеск. Серой линией показан синтетический спектр для  $T_{\text{eff}} = 7000$  К и  $\log g = 3.5$ . Тонкая черная линия показывает тот же спектр после свертки со скоростью вращения звезды  $v = 90$  км/с. Выделены наиболее сильные линии.

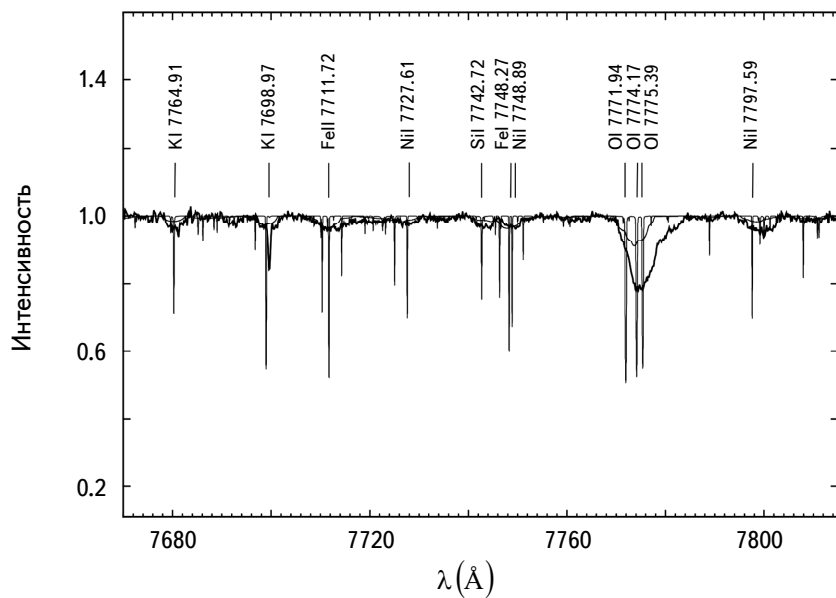


Рис.2. То же самое, что на рис.1 для 29 порядка.

$\beta$  Pictoris в линиях резонансного дублета CaII [9].

На рис.1-6 показаны выборочные порядки полного спектра CQ Тау, полученного путем усреднения спектров, наблюдавшихся в течение трех ночей 1996г. На рисунках показаны также соответствующие участки

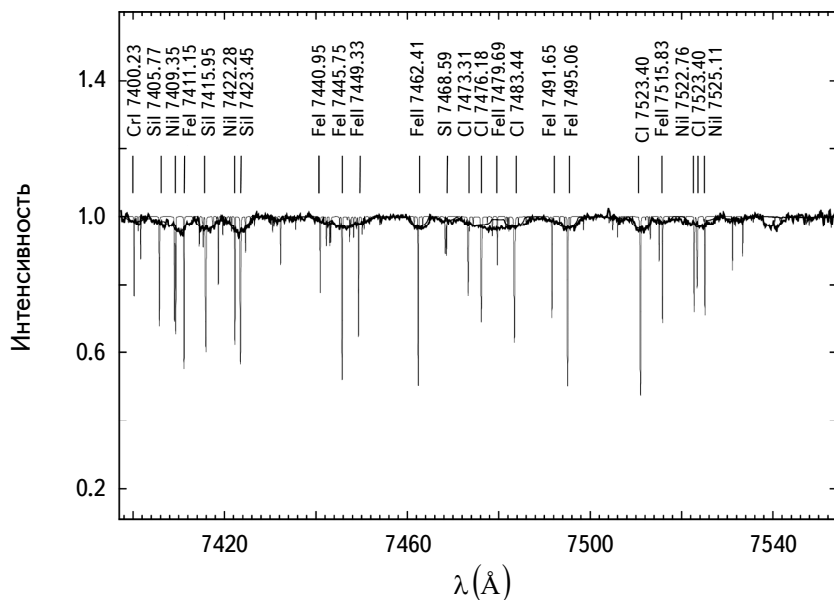


Рис.3. То же самое, что на рис.1 для 30 порядка.

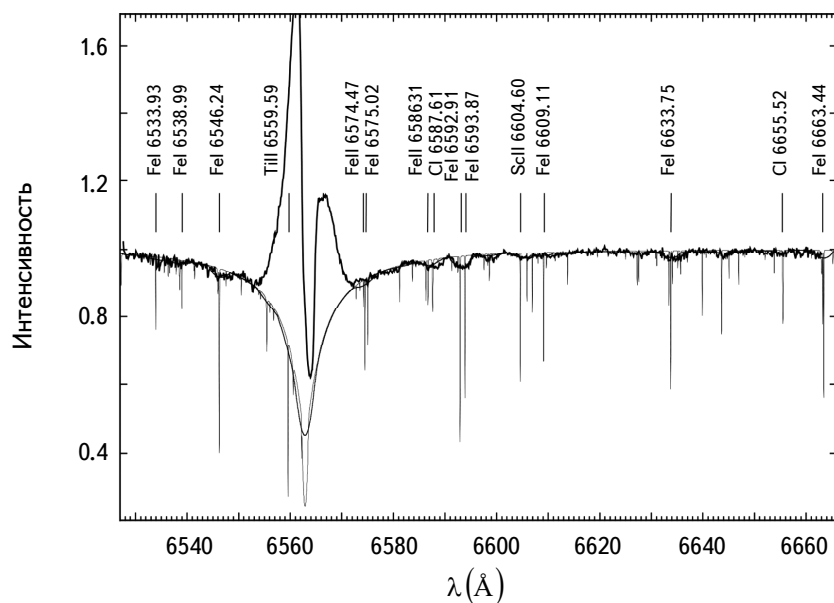


Рис.4. То же самое, что на рис.1 для 34 порядка.

синтетического спектра этой звезды ( $T_{eff} = 7000$  К и  $\log g = 3.5$ ) до и после свертки с проекционной скоростью вращения ( $v \sin i = 90$  км/с [6]). Выборочные порядки полного спектра UX Ori, совмещенные с синтетическим спектром,

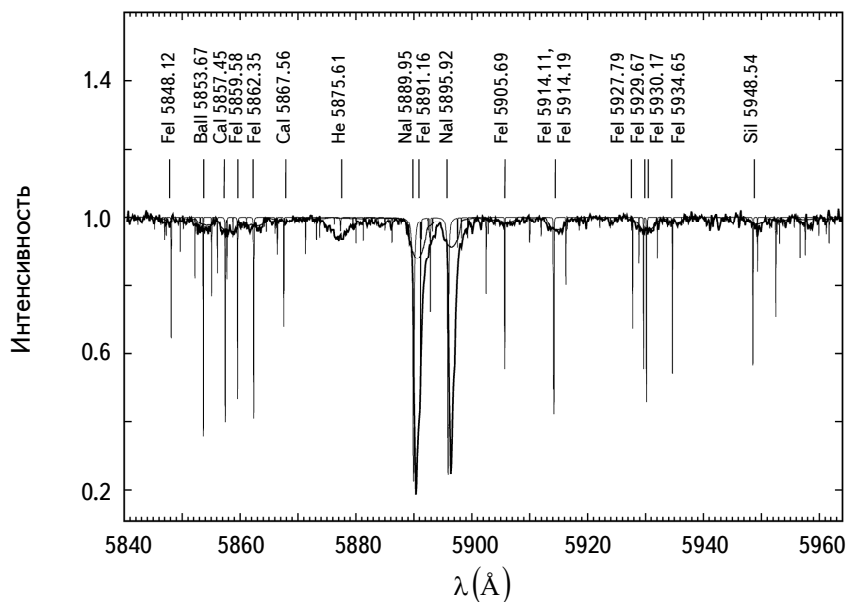


Рис.5. То же самое, что на рис.1 для 39 порядка.

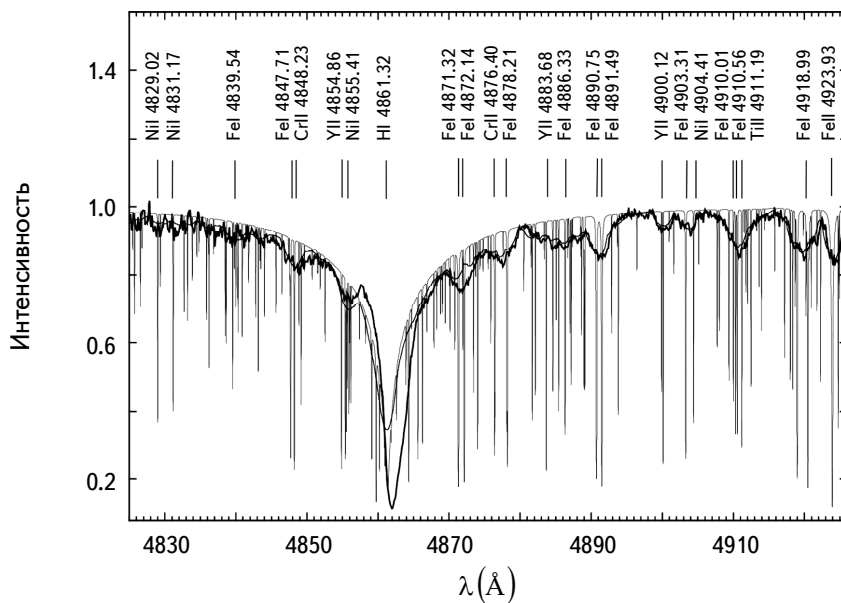


Рис.6. То же самое, что на рис.1 для 46 порядка.

приведены в цитированной выше статье, но показаны в ней небольшими фрагментами.

3. *Спектральная переменность исследуемых звезд в ярком состоянии.* В статье [10] авторы исследовали статистику профилей линии  $H\alpha$  в спектрах звезд типа UX Ori и показали, что двухкомпонентный профиль линии является характерным для звезд этого семейства. Недавно этот вывод был подтвержден в статье [11] на более широком статистическом материале. Линия  $H\alpha$  имеет широкие, почти симметричные крылья в эмиссии, простирающейся до  $\pm 400$  км/с. Типичные лучевые скорости на половинной интенсивности составляют  $\pm 200 - 300$  км/с. При затмении звезды эквивалентная ширина  $EW(H\alpha)$  увеличивается, при этом поток в линии уменьшается. Такая переменность этой линии в спектрах звезд типа UX Ori впервые наблюдалась Колотилковым [12]. В моменты наиболее глубоких минимумов двухкомпонентный профиль линии  $H\alpha$  в спектре CQ Tau трансформируется в однокомпонентный профиль [13]. Такая же трансформация наблюдалась во время глубокого минимума UX Ori [14].

Относительная интенсивность двух эмиссионных пиков  $H\alpha$  со временем меняется. Однако, несмотря на большие временные вариации, для каждой звезды существует общая закономерность, характеризующая профиль  $H\alpha$ . А именно, в UX Ori и CQ Tau синий пик систематически сильнее красного (обратный профиль P Cygni типа III).

Согласно интерпретации Тамбовцевой и др. [15], такие профили ожидаются, если линия  $H\alpha$  формируется в аккреционном диске, видимом почти с ребра. Относительная интенсивность синего и красного пиков определяется комбинацией вращения и движения. Если это так, то профиль обратный P Cygni III у звезд UX Ori и CQ Tau указывает на ситуацию, когда важную роль в формировании линии играет аккреция.

Для звезд этого типа возможны два разных источника спектральной переменности [6]. Один из них характерен для многих молодых звезд с газовыми оболочками. В этом случае переменность эмиссионного спектра связана с вариациями температуры и плотности в излучающей области и на луче зрения. Наблюдения показывают, что такие вариации могут быть достаточно сильными и могут приводить к сильной переменности спектральных линий.

Другой механизм спектральной переменности характерен только для звезд типа UX Ori. Он связан с коронографическим эффектом, создаваемым непрозрачными газопылевыми структурами (облаками) протопланетного диска, которые закрывают звезду от наблюдателя и вызывают глубокие минимумы, характерные для этих звезд. Непрозрачные фрагменты диска экранируют от

Таблица 2

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ ЭКВИВАЛЕНТНЫХ ШИРИН ДЛЯ UX Ori

| Порядок     | Элемент               | $\lambda(\text{\AA})$ | EW ( $\text{\AA}$ ) |
|-------------|-----------------------|-----------------------|---------------------|
| UX Ori 1994 |                       |                       |                     |
| 26          | HI (emission)         | 8598.40               | -1.66 (19/11/94)    |
|             | HI (emission)         | 8665.02               | -1.85 (19/11/94)    |
| 34          | H $\alpha$ (emission) | 6562.80               | -7.61 (19/11/94)    |
| UX Ori 1995 |                       |                       |                     |
| 26          | HI (emission)         | 8598.40               | -1.60 (02/12/95)    |
|             | HI (emission)         | 8598.40               | -1.61 (04/12/95)    |
|             | HI (emission)         | 8598.40               | -1.76 (06/12/95)    |
|             | HI+CaII (emission)    | 8665.02               | -2.50 (02/12/95)    |
|             | H+CaII (emission)     | 8665.02               | -3.09 (04/12/95)    |
|             | HI+CaII (emission)    | 8665.02               | -2.11 (06/12/95)    |
| 34          | H $\alpha$ (emission) | 6562.80               | -13.15 (02/12/95)   |
|             | H $\alpha$ (emission) | 6562.80               | -12.77 (04/12/95)   |
|             | H $\alpha$ (emission) | 6562.80               | -12.72 (06/12/95)   |
|             | H $\alpha$ (emission) | 6562.80               | -10.56 (02/12/95)   |
|             | H $\alpha$ (emission) | 6562.80               | -10.50 (04/12/95)   |
|             | H $\alpha$ (emission) | 6562.80               | -10.08 (06/12/95)   |
| 46          | H $\beta$ (emission)  | 4861.32               | -1.29 (02/12/95)    |
|             | H $\beta$ (emission)  | 4861.32               | -1.12 (04/12/95)    |
|             | H $\beta$ (emission)  | 4861.32               | -1.30 (06/12/95)    |
| 49          | TiII                  | 4563.76               | 0.12                |
| 50          | MgII                  | 4481.33               | 0.59                |
| 54          | TiII                  | 4163.65               | 0.11                |
| 55          | H $\gamma$ (emission) | 4101.73               | -0.29 (02/12/95)    |
| 57          | CaII                  | 3933.66               | 2.18                |
| UX Ori 1996 |                       |                       |                     |
| 26          | HI (emission)         | 8598.40               | -1.68 (25/11/96)    |
|             | HI (emission)         | 8598.40               | -1.86 (28/11/96)    |
|             | HI+CaII (emission)    | 8665.02               | -1.43 (25/11/96)    |
|             | HI+CaII (emission)    | 8665.02               | -1.40 (28/11/96)    |
| 34          | H $\alpha$ (emission) | 6562.80               | -8.46 (25/11/96)    |
|             | H $\alpha$ (emission) | 6562.80               | -5.67 (28/11/96)    |
| 35(1)       | H $\alpha$ (emission) | 6562.80               | -5.52 (28/11/96)    |
|             | H $\alpha$ (emission) | 6562.80               | -5.23 (02/12/96)    |
| 35(2)       | SiII                  | 6347.11               | 0.34                |
|             | SiII                  | 6371.37               | 0.22                |
| 36          | SiII                  | 6347.11               | 0.33                |
|             | SiII                  | 6371.37               | 0.26                |
| 39          | HeI                   | 5875.61               | 0.48                |
|             | NaI                   | 5889.95               | 0.70                |
|             | NaI                   | 5895.92               | 0.54                |
| 47          | H $\beta$ (emission)  | 4861.32               | -0.31 (28/11/96)    |
|             | H $\beta$ (emission)  | 4861.32               | -0.35 (02/12/96)    |

Таблица 3

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ ЭКВИВАЛЕНТНЫХ ШИРИН  
ДЛЯ CQ Tau, 1995

| Порядок     | Элемент               | $\lambda(\text{\AA})$ | EW ( $\text{\AA}$ ) |
|-------------|-----------------------|-----------------------|---------------------|
| 1           | 2                     | 3                     | 4                   |
| CQ Tau 1995 |                       |                       |                     |
| 26          | H I (emission)        | 8598.40               | -0.38 (03/12/95)    |
|             | H I (emission)        | 8598.40               | -0.35 (05/12/95)    |
| 30          | Fe II                 | 7415.95               | 0.12                |
| 34          | H $\alpha$ (emission) | 6562.80               | -8.45 (03/12/95)    |
|             | H $\alpha$ (emission) | 6562.80               | -5.16 (05/12/95)    |
| 35          | Fe I                  | 6393.60               | 0.12                |
|             | Fe I                  | 6400.00               | 0.14                |
|             | Ca I                  | 6439.07               | 0.16                |
|             | Ca I                  | 6449.81               | 0.16                |
|             | Fe II                 | 6456.38               | 0.29                |
|             | Ca I                  | 6462.57               | 0.22                |
| 36          | Ni I, Fe I            | 6191.17, 6191.56      | 0.10                |
| 37          | Fe I                  | 6065.48               | 0.14                |
|             | Fe I                  | 6078.49               | 0.11                |
| 39          | Si I                  | 5747.67               | 0.04                |
|             | Fe I, Si I            | 5753.12, 5753.62      | 0.15                |
|             | Fe I                  | 5762.99               | 0.12                |
|             | Ca I                  | 5581.96               | 0.11                |
| 40          | Ca I, Fe I            | 5594.46, 5594.65      | 0.20                |
|             | Fe I                  | 5624.54               | 0.16                |
| 41          | Fe I                  | 5429.70               | 0.20                |
|             | Fe I, Fe I            | 5455.44, 5455.61      | 0.25                |
|             | Si I                  | 5494.24               | 0.04                |
|             | Fe I                  | 5497.52               | 0.07                |
|             | Fe I                  | 5501.46               | 0.17                |
| 42          | Fe I                  | 5302.30               | 0.10                |
|             | Fe I                  | 5307.36               | 0.12                |
| 43          | Mg I                  | 5172.68               | 0.39                |
|             | Mg I                  | 5183.60               | 0.56                |
|             | Ti II                 | 5188.68               | 0.08                |
|             | Fe I, Fe I            | 5191.45, 5192.34      | 0.17                |
|             | Ti II, Fe I           | 5226.54, 5226.86      | 0.55                |
| 44          | Ni I                  | 5115.39               | 0.05                |
| 45          | Fe I                  | 4957.60               | 0.36                |
|             | Fe I                  | 5027.12               | 0.14                |
| 46          | H $\beta$ (emission)  | 4861.32               | -0.20 (03/12/95)    |
|             | H $\beta$ (emission)  | 4861.32               | -0.26 (05/12/95)    |
|             | Fe I, Fe I            | 4871.32, 4872.14      | 1.10                |
| 47          | Ti II                 | 4779.98               | 0.09                |
|             | Mn I                  | 4783.43               | 0.09                |
|             | Ni I, Fe I            | 4786.53, 4786.81      | 0.08                |



Таблица 3 (Окончание)

| 1  | 2                     | 3                | 4                |
|----|-----------------------|------------------|------------------|
| 48 | FeI                   | 4673.16          | 0.14             |
|    | MgI                   | 4702.99          | 0.22             |
| 49 | TiII                  | 4563.76          | 0.34             |
|    | TiII                  | 4571.97          | 0.26             |
| 50 | FeI, FeI              | 4476.02, 4476.08 | 0.12             |
|    | TiII                  | 4501.27          | 0.28             |
|    | FeII                  | 4508.29          | 0.23             |
|    | FeII                  | 4515.34          | 0.27             |
| 52 | ScII, TiII            | 4314.08, 4314.97 | 1.02             |
|    | ScII, TiII            | 4325.00, 4325.76 | 1.17             |
|    | H $\delta$ (emission) | 4340.46          | -0.05 (03/12/95) |
|    | H $\delta$ (emission) | 4340.46          | -0.01 (05/12/95) |
| 53 | FeI                   | 4260.47          | 1.07             |
|    | FeI                   | 4271.15          | 0.66             |
| 54 | FeI, FeI              | 4143.41, 4143.87 | 1.03             |
|    | TiII                  | 4161.53          | 0.32             |
|    | TiII                  | 4163.65          | 0.21             |
|    | MgI                   | 4167.27          | 0.47             |
| 55 | FeI                   | 4063.59          | 1.04             |
|    | FeI, FeI              | 4071.52, 4071.74 | 0.85             |
|    | H $\gamma$ (emission) | 4101.73          | -0.05 (05/12/95) |

наблюдателя не только звезду, но и ту часть газовой оболочки перед звездой, которая отвечает за абсорбционную составляющую профиля линии. В результате центральное поглощение снижается и может полностью исчезнуть [16]. Этот эффект наблюдается также в изменениях эквивалентных ширин эмиссионных линий, таких как линия H $\alpha$ , образующихся в протяженной области, которая только частично экранируется околосветными облаками.

**4. Результаты.** Результаты измерений эквивалентных ширин звезд UX Ori и CQ Tau приведены в табл.2-4, где в столбце 1 указан порядок эшелювого спектра, в столбце 2 - химический элемент, принадлежащий линии, в столбце 3 - длина волны спектральной линии (в ангстремах) и в столбце 4 - значение эквивалентной ширины EW (в ангстремах).

Следует отметить, что эквивалентные ширины измерялись по усредненному спектру, но для эмиссионных водородных линий измерения проводились для каждого момента времени отдельно, поэтому в таблицах указывалась дата наблюдения рядом со значением EW. Отрицательные значения EW указывают на эмиссионные линии. Определение эквивалентных ширин эмиссионных линий проводилось с помощью синтетических спектров: эмиссией считалось все, что лежит выше синтетических профилей линий, расширенных вращением

Таблица 4

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ ЭКВИВАЛЕНТНЫХ ШИРИН  
ДЛЯ CQ Tau, 1996

| Порядок     | Элемент               | $\lambda(\text{\AA})$     | EW ( $\text{\AA}$ ) |
|-------------|-----------------------|---------------------------|---------------------|
| 1           | 2                     | 3                         | 4                   |
| CQ Tau 1996 |                       |                           |                     |
| 29          | KI                    | 7664.91                   | 0.96                |
|             | KI                    | 7698.97                   | 0.38                |
|             | OI, OI, OI            | 7771.94, 7774.17, 7775.39 | 1.17                |
| 30          | FeII                  | 7462.41                   | 0.18                |
|             | SI                    | 7468.59                   | 0.04                |
|             | FeI                   | 7495.06                   | 0.18                |
| 34          | H $\alpha$ (emission) | 6562.80                   | -11.99 (21/11/96)   |
|             | H $\alpha$ (emission) | 6562.80                   | -8.57 (26/11/96)    |
|             | H $\alpha$ (emission) | 6562.80                   | -7.46 (29/11/96)    |
| 35(1)       | FeII, FeI             | 6393.60                   | 0.16                |
|             | FeI                   | 6400.00                   | 0.14                |
|             | CaI                   | 6439.07                   | 0.21                |
|             | CaI                   | 6449.81                   | 0.15                |
|             | CaI                   | 6462.57                   | 0.18                |
| 35(2)       | H $\alpha$ (emission) | 6562.80                   | -7.65 (29/11/96)    |
|             | H $\alpha$ (emission) | 6562.80                   | -5.97 (02/12/96)    |
| 36          | FeI                   | 6200.31                   | 0.11                |
|             | FeI                   | 6219.28                   | 0.12                |
|             | FeI, FeI              | 6230.73, 6232.64          | 0.21                |
| 37          | FeI                   | 6008.55                   | 0.20                |
|             | MnI, MnI              | 6013.51, 6016.67          | 0.21                |
|             | FeI                   | 6065.48                   | 0.12                |
|             | FeI                   | 6078.49                   | 0.13                |
| 39          | SiI                   | 5747.67                   | 0.11                |
|             | FeI, SiI              | 5753.12, 5753.62          | 0.16                |
|             | FeI                   | 5762.99                   | 0.16                |
| 40          | CaI                   | 5581.96                   | 0.12                |
|             | FeI, FeI, FeI         | 5615.30, 5615.64, 5618.63 | 0.32                |
| 41          | TiII                  | 5418.12                   | 0.18                |
|             | FeI, FeII             | 5424.64, 5425.26          | 0.28                |
|             | FeI                   | 5429.70                   | 0.22                |
|             | FeII, FeI             | 5432.97, 5434.52          | 0.40                |
|             | FeI, FeI              | 5445.04, 5446.92          | 0.40                |
|             | FeI, FeI              | 5455.44, 5455.61          | 0.26                |
|             | FeI                   | 5497.52                   | 0.19                |
| 43          | MgI                   | 5183.60                   | 0.79                |
|             | TiII                  | 5188.68                   | 0.21                |
|             | FeI, FeI              | 5191.45, 5192.34          | 0.39                |
|             | CrI, CrI, CrI         | 5204.51, 5206.04, 5208.42 | 0.91                |
|             | FeI, FeI, FeI         | 5215.18, 5216.27, 5217.39 | 0.43                |
|             | TiII, FeI             | 5226.54, 5226.86          | 0.70                |

Таблица 4 (Окончание)

| 1  | 2                           | 3                | 4                |
|----|-----------------------------|------------------|------------------|
| 44 | FeI, FeI                    | 5049.82, 5051.63 | 0.51             |
|    | FeI                         | 5065.01          | 0.56             |
|    | FeI                         | 5068.76          | 0.41             |
|    | TiII, FeI                   | 5072.28, 5074.75 | 0.64             |
|    | FeI, FeI                    | 5107.64, 5110.41 | 0.42             |
|    | NiI                         | 5115.39          | 0.12             |
| 45 | FeI                         | 4957.60          | 0.37             |
| 46 | H $\beta$ (emission)        | 4861.32          | -0.67 (21/11/96) |
|    | H $\beta$ (emission)        | 4861.32          | -0.53 (26/11/96) |
|    | H $\beta$ (emission)        | 4861.32          | -0.26 (29/11/96) |
| 47 | H $\beta$ (emission)        | 4861.32          | -0.29 (29/11/96) |
| 52 | H $\delta$ (emission)       | 4340.46          | -0.14 (21/11/96) |
|    | TiII, H $\delta$ (emission) | 4340.46          | -0.14 (26/11/96) |
| 55 | H $\gamma$ (emission)       | 4101.73          | -0.08 (21/11/96) |
|    | H $\gamma$ (emission)       | 4101.73          | -0.08 (26/11/96) |
|    | H $\gamma$ (emission)       | 4101.73          | -0.02 (29/11/96) |

звезды и смещенных в систему координат звезды. Точность измерения EW можно оценить по уровню шумов в континууме, определяемых отношением S/N. Вблизи линии H $\alpha$   $S/N \approx 100$  [6], что обеспечивает точность определения EW(H $\alpha$ ) в несколько процентов.

Следующий важный параметр, который мы определили, это темп аккреции. Он представлен в табл.5. Звезды аккрецируют околозвездное вещество в соответствии с магнитосферной моделью аккреции (см. например, Натта и др. [17]), которая объясняет наблюдаемые избыточные потоки в спектрах звезд Хербига. Падающий материал, находящийся в окружении звезды, взаимодействуя с фотосферой, вызывает избыточное УФ-излучение, светимость которого зависит от параметров звезды и темпа аккреции. Знание аккреционной светимости позволяет определить темп аккреции (см. ниже). Таким образом, темп аккреции является важным параметром молодых звезд, показывающим количество вещества (в единицах масс Солнца в год) перетекающего из околозвездного диска на поверхность звезды. У молодых звезд важную роль в процессе аккреции играет взаимодействие вещества протопланетного диска с магнитосферой звезды.

Для определения аккреционной светимости мы выбрали эмиссионную линию H $\alpha$ , так как эта линия является наиболее сильной из присутствующих в оптических спектрах молодых звезд. Светимость звезды в этой линии вычислялась с использованием звездного потока  $f_\lambda$  на длине волны линии, рассчитанного по моделям Куруча [18] с учетом расстояния до звезды (1).

Таблица 5

ОЦЕНКИ ТЕМПА АККРЕЦИИ ДЛЯ ЗВЕЗД UX Ori И  
CQ Tau ПО ЛИНИИ H $\alpha$

| Звезда | EW (Å) | Дата     | $L_{acc} (L_{\odot})$ | $\dot{M} \cdot 10^{-7} (M_{\odot}/\text{г.})$ | $\dot{\bar{M}} \cdot 10^{-7} (M_{\odot}/\text{г.})$ |
|--------|--------|----------|-----------------------|-----------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| UX Ori | 7.610  | 19/11/94 | 1.33                  | 0.75                                          | $0.93 \pm 0.11$                                     |
|        | 13.150 | 02/12/95 | 2.41                  | 1.36                                          |                                                     |
|        | 12.772 | 04/12/95 | 2.33                  | 1.32                                          |                                                     |
|        | 12.719 | 06/12/95 | 2.32                  | 1.31                                          |                                                     |
|        | 10.555 | 02/12/95 | 1.89                  | 1.07                                          |                                                     |
|        | 10.502 | 04/12/95 | 1.88                  | 1.06                                          |                                                     |
|        | 10.084 | 06/12/95 | 1.80                  | 1.02                                          |                                                     |
|        | 8.457  | 25/11/96 | 1.49                  | 0.84                                          |                                                     |
|        | 5.672  | 28/11/96 | 0.96                  | 0.54                                          |                                                     |
|        | 5.524  | 28/11/96 | 0.93                  | 0.53                                          |                                                     |
|        | 5.229  | 02/12/96 | 0.88                  | 0.50                                          |                                                     |
| CQ Tau | 8.445  | 03/12/95 | 0.67                  | 0.42                                          | $0.39 \pm 0.01$                                     |
|        | 5.161  | 05/12/95 | 0.40                  | 0.24                                          |                                                     |
|        | 11.992 | 21/11/96 | 0.99                  | 0.61                                          |                                                     |
|        | 8.566  | 26/11/96 | 0.68                  | 0.42                                          |                                                     |
|        | 7.459  | 29/11/96 | 0.59                  | 0.37                                          |                                                     |
|        | 7.649  | 29/11/96 | 0.60                  | 0.37                                          |                                                     |
|        | 5.971  | 02/12/96 | 0.46                  | 0.28                                          |                                                     |

$$L_{H\alpha} = 4\pi d^2 f_{\lambda} \text{EW}_{H\alpha} . \quad (1)$$

Использовалось следующее соотношение между аккреционной светимостью и светимостью в линии [8]:

$$\log \frac{L_{acc}}{L_{\odot}} = A + B \log \frac{L_{line}}{L_{\odot}} , \quad (2)$$

где  $A$  и  $B$  - коэффициенты, соответствующие точке пересечения и градиенту соотношения между  $\log(L_{acc}/L_{\odot})$  и  $\log(L_{line}/L_{\odot})$ , соответственно.

Следуя [8], мы использовали следующие значения:  $A = 2.09 \pm 0.06$  и  $B = 1.00 \pm 0.05$ . Темп аккреции определялся из аккреционной светимости, звездного радиуса и звездной массы по формуле [19]:

$$\dot{M} = \frac{L_{acc} R_{*}}{GM_{*}(1 - R_{*}/r_c)} , \quad (3)$$

где радиус коротации

$$\frac{r_c}{R_{*}} = \left( \frac{GM}{R_{*} v_{*}^2} \right)^{1/3} . \quad (4)$$

Для UX Ori  $r_c = 2.17 R_*$ , для CQ Tau  $r_c = 2.69 R_*$ . В табл.5 занесены значения темпа аккреции, рассчитанные по формулам 2, 3. В столбце 1 указано название звезды, в столбце 2 - эквивалентная ширина линии H $\alpha$ , в столбце 3 - дата наблюдения, в столбце 4 - аккреционная светимость, в столбце 5 - темп аккреции, в столбце 6 - среднее значение темпа аккреции.

Как видно, при одном и том же уровне блеска звезды прослеживается нестабильность темпа аккреции, значения которого могут отличаться в 2 раза. Неоднородность аккрецирующего материала является одним из источников как фотометрической, так и спектральной переменности исследуемых звезд [20].

Согласно Гузман-Диаз и др. [21], темп аккреции исследуемых звезд составляет  $\log \dot{M}_{acc} = -7.00$  для UX Ori и  $\log \dot{M}_{acc} = -7.18$  для CQ Tau, что в целом согласуется с нашими результатами и показывает правильность метода расчета темпа аккреции и возможности его применения для исследований других звезд типа UX Ori.

**5. Обсуждение и заключение.** В работе были определены эквивалентные ширины ряда индивидуальных линий по спектрам звезд UX Ori и CQ Tau, полученным в моменты времени, когда оба объекта находились в ярком состоянии (вне затмений). Значения эквивалентных ширин отражают спектральные характеристики звезд и могут использоваться в качестве опорных линий, характеризующих состояние звездных атмосфер. В спектрах звезд UX Ori и CQ Tau наблюдаются многочисленные фотосферные линии металлов (MgI, FeI, Ti, SiI и др.), дублет натрия и сильная эмиссия в водородных линиях.

По эквивалентной ширине эмиссионной линии H $\alpha$  сделаны оценки темпа аккреции на звезды UX Ori и CQ Tau. Для звезды UX Ori средний темп аккреции составил  $0.93 \cdot 10^{-7} (M_\odot/\text{год})$ , для звезды CQ Tau -  $0.39 \cdot 10^{-7} (M_\odot/\text{год})$ . Следует подчеркнуть, что для определения темпа аккреции на исследуемые звезды была использована аналогия с магнитосферной моделью аккреции, разработанной для звезд типа Т Тельца. Эмиссионные спектры звезд этого типа образуются преимущественно в магнитосферах звезд. Вклад дискового ветра в эмиссию в линии H $\alpha$  в спектрах этих звезд незначителен (за исключением звезд с интенсивной аккрецией). В случае звезд типа UX Ori, большинство которых относится к семейству звезд AeBe Херbiga, вклад магнитосферы значительно меньше, чем у звезд Т Тельца. Основной вклад в эмиссию у них дает дисковый ветер [22]. Кроме того, звезды типа UX Ori вращаются значительно быстрее по сравнению со звездами Т Тельца, что также затрудняет применение к ним магнитосферной модели аккреции. Учитывая это, полученные выше оценки темпа аккреции следует рассматривать

скорее как верхние пределы.

Следует отметить, что темп аккреции для исследуемых звезд определялся в последнее время рядом авторов [8,20,23]. Наши результаты лучше всего согласуются с результатами Гузман-Диаз и др. [21], полученными на основе новой эмпирической корреляции между светимостью и массой звезды.

В результатах прослеживается нестабильность темпа аккреции, значения которого могут отличаться в 2 раза при одном и том же уровне блеска звезды. Эта нестабильность аккреции наблюдалась по спектрам, полученным вне затмений, и свидетельствует о сильных флуктуациях плотности газа во внутренних областях околос звездных дисков исследуемых звезд. Учитывая их молодость, причиной таких флуктуаций могут быть возмущения в дисках, вызванные формированием планетных систем.

Авторы выражают искреннюю благодарность В.П.Гринину за помощь в подготовке и написании статьи, а также рецензенту Л.В.Тамбовцевой за полезные замечания.

<sup>1</sup> СПбГУ, Санкт-Петербург, Россия, e-mail: st110648@student.spbu.ru

<sup>2</sup> Крымская Астрофизическая Обсерватория, Крым, Научный, Россия

## QUANTITATIVE ANALYSIS OF THE SPECTRA OF CQ Tau AND UX Ori STARS OUTSIDE ECLIPSES ACCORDING TO THE NORDIC OPTICAL TELESCOPE

P.DIMITRIEVA<sup>1</sup>, O.V.KOZLOVA<sup>2</sup>

A quantitative analysis of the spectra of CQ Tau and UX Ori stars belonging to the family of young irregular variable stars with Algol-like decrease in brightness has been performed. The spectra were obtained at the Nordic Optical Telescope (NOT) observatory at times when the stars were in a bright state. On their basis, the equivalent widths of the photospheric absorption lines, as well as the emission line  $H\alpha$ , are determined. The equivalent width of the latter is used to estimate the gas accretion rate on the stars.

Keywords: *variable stars: spectra: CQ Tau, UX Ori*

## ЛИТЕРАТУРА

1. *W. von Gotz, W.Wenzel*, Mitt. Vernd. Sterne, **5**, 2, 1968.
2. *W.Herbst, J.A.Holtzman, R.S.Klasky*, Astron. J., **88**, 1648, 1983.
3. *Г.В.Зайцева*, Variable Stars, **19**, 63, 1973.
4. *V.P.Grinin, N.N.Kiselev, N.K.Minikulov et al.*, Astrophys. J. Suppl. Ser., **186**, 283, 1991.
5. *A.Kreplin, G.Weigelt, Kraus et al.*, Astron. Astrophys., **551**, A21, 2013.
6. *V.P.Grinin, O.V.Kozlova, A.Natta et al.*, Astron. Astrophys., **379**, 482, 2001.
7. *A.N.Rostopchina*, Astron. Rep., **43**, 113, 1999.
8. *C.Wichittanakom, R.D.Oudmaijer, J.R.Fairlamb et al.*, Mon. Not. Roy. Astron. Soc., **493**, 234, 2020.
9. *A.M.Lagrange-Henri, A.Vidal-Madjar, R.Ferlet*, Astron. Astrophys., **190**, 275, 1988.
10. *V.P.Grinin, A.N.Rostopchina*, Astron. Rep., **40**, 171, 1996.
11. *M.Vioque, R.D.Oudmaijer, D.Baines et al.*, Astron. Astrophys., **620**, A128, 2018.
12. *E.A.Kolotilov*, Astrofizika, **13**, 33, 1977.
13. *O.V.Kozlova, V.P.Grinin, A.N.Rostopchina*, Astron. Rep., **44**, 36, 2000.
14. *V.P.Grinin, P.S.Thé, D. de Winter et al.*, Astron. Astrophys., **292**, 165, 1994.
15. *L.V.Tambovtseva, V.P.Grinin, O.V.Kozlova*, Astrophysics, **42**, 54, 1999.
16. *V.P.Grinin, L.V.Tambovtseva*, Astron. Astrophys., **293**, 396, 1995.
17. *A.Natta, L.Testi, J.Muzerolle et al.*, Astron. Astrophys., **424**, 603, 2004.
18. *R.L.Kurucz*, Astrophys. J. Suppl., **40**, 1, 1979.
19. *E.Gullbring, L.Hartmann, C.Bricco et al.*, Astrophys. J., **492**, 323, 1998.
20. *O.V.Kozlova, D.N.Shakhovskoi, A.N.Rostopchina et al.*, Astrophysics, **50**, 26, 2007.
21. *J.Guzmán-Díaz, I.Mendigutía, B.Montesinos et al.*, Astron. Astrophys., **650**, A182, 2021.
22. *V.P.Grinin, L.V.Tambovtseva*, Astron. Rep., **55**, 704, 2011.
23. *B.Donehew, S.Brittain*, Astron. J., **141**, 46, 2011.