

## ФОТОМЕТРИЧЕСКИЕ И СПЕКТРАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОБЪЕКТА Be/X-RAY BINARY V725 TAU = A0535 + 262

Л.Н.КОНДРАТЬЕВА, Э.К.ДЕНИСЮК, И.В.РЕВА, М.А.КРУГОВ,  
А.К.АЙМАНОВА, А.В.КУСАКИН, Б.К.ОМАР

Поступила 31 марта 2020

Принята к печати 24 июня 2020

В статье представлены результаты спектральных и фотометрических наблюдений двойной звездной системы с рентгеновской компонентой V725 Tauri = A0535 + 262. Она состоит из звезды-гиганта HDE 245770 спектрального класса O9.7 и пульсара A0535+26 с периодом пульсаций ~103 с. Активные стадии этого объекта, сопровождаемые "гигантскими" рентгеновскими вспышками, наблюдались неоднократно. Последние события имели место в 2009-2011 гг. В результате наших исследований, проведенных в 2017-2020 гг., получены следующие данные: в течение трех последних лет блеск объекта в полосах *B* и *V* оставался на высоком уровне, в конце 2019 г. началось его понижение. При этом, начиная с 2016 г., наблюдается постепенное увеличение потоков излучения в эмиссионных линиях H $\beta$  и H $\alpha$ . В настоящее время эквивалентные ширины этих линий превышают значения, зарегистрированных во время гигантской рентгеновской вспышки 2011 г. Предыдущие исследования показали, что подобное сочетание характеристик данного объекта, а именно возрастание потоков излучения в эмиссионных линиях при ослаблении блеска, регистрируются накануне наступления активной стадии.

**Ключевые слова:** *переменные звезды; эмиссионные линии; индивидуальные объекты; V725 Tauri*

**1. Введение.** Двойные звездные системы Be/X-ray, как правило, состоят из массивной звезды раннего спектрального класса (Oe, Be) и нейтронной звезды. Первая компонента является донором, поставляющим вещество на вторую звезду. Быстро вращающаяся звезда раннего спектрального класса окружена тонким экваториальным диском, в котором формируются эмиссионные линии. Механизм приливного взаимодействия ограничивает размеры диска до, так называемого, резонансного радиуса, при котором отношение угловых скоростей вращения диска и движения по орбите нейтронной звезды равно целому числу. Именно поэтому в Be/X-ray системах наблюдается зависимость между максимальным значением эквивалентной ширины  $EW(H\alpha)$  и орбитальным периодом нейтронной звезды [1,2].

Большинство нейтронных звезд в описываемых системах имеют вытянутые орбиты, таким образом, расстояние между компонентами существенно меняется в пределах цикла. Взаимодействие между нейтронной звездой и околозвездным

диском приводит к переменности потока в рентгеновском диапазоне.

Наблюдается два основных типа переменности: "нормальные" вспышки I типа происходят вблизи периастра и имеют светимость  $L < 10^{37}$  эрг/с. В процессе "гигантской" вспышки II типа светимость объекта достигает более высоких значений ( $L > 10^{37}$  эрг/с). Подобные вспышки непредсказуемы по времени и могут начаться в любой орбитальной фазе.

Влияние, которое оказывают гигантские вспышки на состояние околозвездного диска, рассматривалось в работе [3]. Установлено, что структура диска подвергается существенной перестройке: изменению формы, частичному или полному разрушению [4].

Объект V725 Тау состоит из звезды-гиганта HDE 245770 спектрального класса O9.7 и пульсара A0535+26 с периодом пульсаций  $\sim 103$  с [5]. Периодические изменения рентгеновского излучения объясняются вращением нейтронной звезды с периодом  $111.07 \pm 0.07$  суток [6].

Начиная с момента открытия в 1975г., эта звездная система испытала гигантские рентгеновские вспышки, несвязанные с прохождением периастра, в октябре 1980г. [7], июне 1983г. [8], марте 1989г. [9], феврале 1994г. [5,10] и в мае 2005г. [11-13]. Последние вспышки имели место в 2009г. и 2011гг. [14-17].

*2. Наблюдения и обработка.* В Астрофизическом институте им. Фесенкова фотометрические и спектральные наблюдения V725 Тау проводятся, начиная с 2007г. Данные, полученные за предыдущие годы, опубликованы в работе [18].

В настоящее время регулярные фотометрические наблюдения проводятся на "восточном" 1-м телескопе фирмы Карл Цейсс Йена Тянь-Шанской Обсерватории (ТШАО). Для регистрации блеска используется ПЗС камера Alta F16M (4096 x 4096, 9  $\mu$ m) фирмы Arogee и набор *BVR* фильтров в системе Джонсона. В качестве фотометрических стандартов для этого объекта использовались звезды HD 245816, HD 245817, HD 245689, расположенные в непосредственной близости от объекта. Первичная обработка изображений состоит из стандартных операций с использованием служебных файлов Bias, Dark и Flat. Измерения изображений выполняются с использованием пакетов стандартных программ MaximDL 6 и IRAF. Учет атмосферной экстинкции и приведение полученных инструментальных оценок блеска к стандартной системе выполняются с помощью системы соответствующих уравнений, учитывающих разность показателей цвета объекта и стандарта.

В 2017г. спектральные наблюдения выполнялись на телескопе АЗТ-8 с диаметром зеркала 0.7-м и 1-м телескопе, установленном на Обсерватории Ассы-Тургень. Приемниками излучения на выходе спектрографов служили

ПЗС камеры SBIG ST-8 (1530 x 1024, 9 $\mu$ ). Доступный для наблюдений спектральный диапазон составлял  $\sim 3500 \text{ \AA}$  (4000-7500  $\text{\AA}$ ). В 2018г. спектрограф телескопа АЗТ-8 был оборудован новой ПЗС камерой SBIG STT-3200 (2184 x 1472, 6.8 $\mu$ ). Дополнительно несколько спектрограмм объекта было получено на "западном" 1-м телескопе ТШАО с Эшелле-спектрографом (табл.1).

Таблица 1

## ЖУРНАЛ НАБЛЮДЕНИЙ ОБЪЕКТА V725 Tau ЗА ПЕРИОД 2017-2020гг.

| Дата наблюдений | Тип наблюдений | Диапазон длин волн ( $\text{\AA}$ ) | Спектральное разрешение | Телескоп<br>Обсерватория |
|-----------------|----------------|-------------------------------------|-------------------------|--------------------------|
| 21.02.2017      | Спектры        | 4400-5100<br>6100-6800              | 9800<br>13000           | 1-м Ассы-Тургень         |
| 25.03.2017      | Фотометрия     | <i>BVR</i>                          |                         | 1-м ТШАО                 |
| 20.11.2017      | Спектры        | 4400-5100                           | 9800                    | 1-м Ассы-Тургень         |
|                 | Спектры        | 6100-6800                           | 13000                   |                          |
|                 | Фотометрия     | <i>BVR</i>                          |                         |                          |
| 02.01.2018      | Спектры        | 6100-6800                           | 13000                   | 1-м ТШАО                 |
| 24.01.2018      | Фотометрия     | <i>BVR</i>                          |                         | 1-м ТШАО                 |
| 01.02.2018      | Фотометрия     | <i>BVR</i>                          |                         | 1-м ТШАО                 |
| 04.02.2018      | Фотометрия     | <i>BVR</i>                          |                         | 1-м ТШАО                 |
| 10.02.2018      | Спектры        | 4400-5100<br>6100-6800              | 7000<br>9300            | 0.7-м АЗТ-8              |
| 02.12.2018      | Спектры        | 4400-5100<br>6100-6800              | 7000<br>9300            | 0.7-м АЗТ-8              |
| 04.12.2018      | Спектры        | 6100-6800                           | 13000                   | 1-м ТШАО                 |
| 05.01.2019      | Фотометрия     | <i>BVR</i>                          |                         | 1-м ТШАО                 |
| 06.01.2019      | Спектры        | 4400-5100                           | 9800                    | 1-м ТШАО                 |
| 25.01.2019      | Фотометрия     | <i>BVR</i>                          |                         | 1-м ТШАО                 |
| 29.01.2019      | Эшелле спектры | 4300-7300                           | 60000                   | 1-м ТШАО                 |
| 08.02.2019      | Фотометрия     | <i>BVR</i>                          |                         | 1-м ТШАО                 |
| 29.10.2019      | Фотометрия     | <i>BVR</i>                          |                         | 1-м ТШАО                 |
| 08.11.2019      | Фотометрия     | <i>BVR</i>                          |                         | 1-м ТШАО                 |
| 15.11.2019      | Фотометрия     | <i>BVR</i>                          |                         | 1-м ТШАО                 |
| 25.11.2019      | Фотометрия     | <i>BVR</i>                          |                         | 1-м ТШАО                 |
| 30.11.2019      | Фотометрия     | <i>BVR</i>                          |                         | 1-м ТШАО                 |
| 02.01.2020      | Спектры        | 6100-6800                           | 9300                    | 0.7-м АЗТ-8              |
| 05.01.2020      | Спектры        | 4400-5100                           | 7000                    | 0.7-м АЗТ-8              |
| 18.01.2020      | Фотометрия     | <i>BVR</i>                          |                         | 1-м ТШАО                 |
| 08.02.2020      | Фотометрия     | <i>BVR</i>                          |                         | 1-м ТШАО                 |
| 20.02.2020      | Спектры        | 6100-6800                           | 9300                    | 0.7-м АЗТ-8              |
| 25.02.2020      | Фотометрия     | <i>BVR</i>                          |                         | 1-м ТШАО                 |
| 29.02..2020     | Спектры        | 6100-6800                           | 9300                    | 0.7-м АЗТ-8              |
| 08.03.2020      | Фотометрия     | <i>BVR</i>                          |                         | 1-м ТШАО                 |
| 13.03.2020      | Спектры        | 6100-6800                           | 9300                    | 0.7-м АЗТ-8              |
| 20.03.2020      | Фотометрия     | <i>BVR</i>                          |                         | 1-м ТШАО                 |
| 23.03.2020      | Фотометрия     | <i>BVR</i>                          |                         | 1-м ТШАО                 |

В процессе наблюдений спектрограммы исследуемого объекта и стандарта получаются с широкой (7"-10") входной щелью для того, чтобы зарегистрировать полный поток излучения. Для V725 Тау в качестве стандарта используется звезда HD 36819 с известным распределением энергии [19]. Стандартная обработка файлов состоит из вычитания темнового фона, учета ошибки поля и учета атмосферного поглощения. Спектральная чувствительность аппаратуры определяется при сопоставлении наблюдаемого распределения энергии в спектре стандарта с данными каталога [19]. После учета всех поправок определяются значения потоков излучения в абсолютных энергетических единицах. Для исследования профилей эмиссионных линий используются спектрограммы объекта, полученные с узкой (3") входной щелью.

В табл.1 приводится журнал наблюдений объекта V725 Тау за период 2017-2020гг.

3. *Полученные результаты.* Результаты фотометрических наблюдений объекта V725 Тау приведены в табл.2 и на рис.1. Для более полного представления о поведении исследуемого объекта на рис.1 добавлены данные наблюдений, охватывающие, в том числе, последнюю из трех гигантских рентгеновских вспышек (2009-2011гг.). В оптическом диапазоне в этот период наблюдался минимум блеска. Аналогичное сочетание максимального потока

Таблица 2

## ОЦЕНКИ БЛЕСКА V725 Тау В ФИЛЬТРАХ В И V

| Дата наблюдений | JD-2400000 | <i>B</i>    | <i>V</i>     |
|-----------------|------------|-------------|--------------|
| 25.03.2017      | 57838.20   | 9.465±0.032 | 8.884±0.032  |
| 20.11.2017      | 58078.29   | 9.496±0.010 | 8.910±0.008  |
| 02.01.2018      | 58121.15   | 9.512±0.004 | 8.891±0.006  |
| 02.02.2018      | 58151.349  | 9.516±0.004 | 8.890±0.006  |
| 24.01.2018      | 58143.12   | 9.474±0.009 | 8.871±0.007  |
| 04.02.2018      | 58154.10   | 9.513±0.010 | 8.864±0.005  |
| 05.01.2019      | 58489.20   | 9.474±0.009 | 8.842±0.005  |
| 25.01.2019      | 58509.27   | 9.482±0.010 | 8.818±0.032  |
| 08.02.2019      | 58523.14   | 9.468±0.020 | 8.853±0.023  |
| 29.10.2019      | 58786.40   | 9.550±0.046 | 9.032±0.042  |
| 08.11.2019      | 58796.34   | 9.510±0.047 | 8.996±0.036  |
| 15.11.2019      | 58802.34   | 9.599±0.023 | 9.044±0.034  |
| 25.11.2019      | 58813.33   | 9.582±0.056 | 9.021±0.044  |
| 30.11.2019      | 58818.26   | 9.600±0.020 | 9.030±0.012  |
| 18.01.2020      | 58867.33   | 9.628±0.016 | 9.035±0.029  |
| 08.02.2020      | 58.888.21  | 9.585±0.013 | 8.995±0.023  |
| 25.02.2020      | 58905.09   | 9.635±0.005 | 9.068±0.014  |
| 08.03.2020      | 58917.10   | 9.692±0.020 | 9.148±0.014  |
| 20.03.2020      | 58929.19   | 9.694±0.020 | 9.130±0.019. |
| 23.03.2020      | 58932.17   | 9.676±0.016 | 9.145±0.014  |

в рентгене с минимальным уровнем блеска в оптическом диапазоне наблюдается в этом объекте, начиная с 2002г. [20]. Значительное, но кратковременное увеличение яркости V725 Tau было зарегистрировано в начале 2013г. (JD = 2456300). Новое повышение блеска началось в декабре 2015г., резкое усиление потока излучения в рентгеновском диапазоне (4-10кэВ) было зарегистрировано

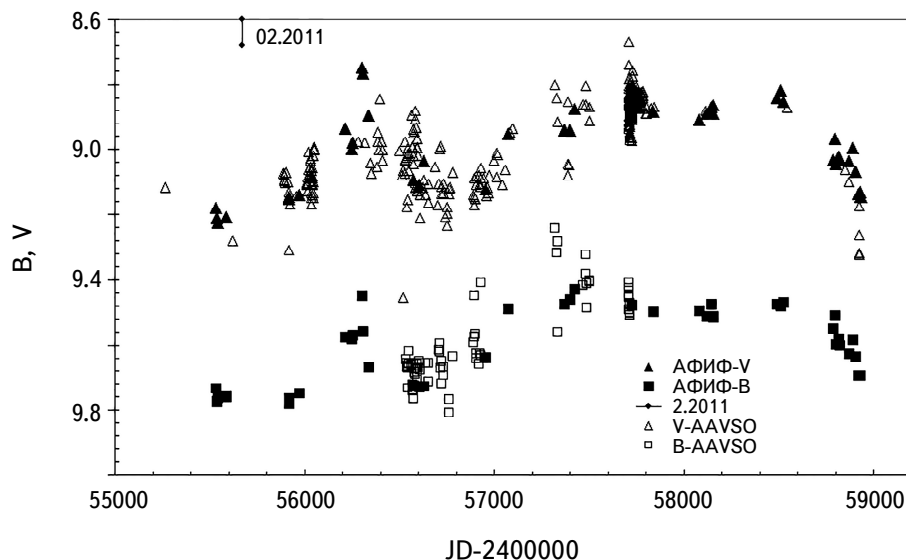


Рис.1. Изменение блеска объекта V725 Tau в 2010-2020гг. Ось X - шкала юлианских дней, ось Y - шкала звездных величин в B фильтре (квадратики) и в V фильтре (треугольники).

Таблица 3

### ПОТОКИ ИЗЛУЧЕНИЯ И ЭКВИВАЛЕНТНЫЕ ШИРИНЫ ЭМИССИОННЫХ ЛИНИЙ

| Дата наблюдений | JD-2400000 | $F(\text{H}\alpha) \cdot 10^{11}$<br>эрг/см <sup>2</sup> с | EW(H $\alpha$ )<br>Å | $F(\text{H}\beta) \cdot 10^{12}$<br>эрг/см <sup>2</sup> с | EW(H $\beta$ )<br>Å |
|-----------------|------------|------------------------------------------------------------|----------------------|-----------------------------------------------------------|---------------------|
| 21.02.2017      | 57806.119  | 1.51±0.15                                                  | 16.9±0.9             | 0.93±0.11                                                 |                     |
| 20.11.2017      | 58078.333  | 1.75±0.10                                                  | 17.5±0.8             | 1.63±0.17                                                 | 1.71±0.09           |
| 10.02.2018      | 58160.099  | 1.71±0.22                                                  | 14.3±0.9             |                                                           |                     |
| 02.12.2018      | 58455.119  | 1.55±0.18                                                  | 12.0±1.1             |                                                           |                     |
| 04.12.2018      | 58457.275  |                                                            |                      | 1.07±0.12                                                 | 1.18±0.10           |
| 06.01.2019      | 58490.237  | 1.59±0.15                                                  | 16.6±1.3             | 1.79±0.10                                                 | 1.18±0.09           |
| 08.11.2019      | 58765.330  |                                                            |                      |                                                           |                     |
| 02.01.2020      | 58851.200  |                                                            |                      |                                                           |                     |
| 05.01.2020      | 58854.188  |                                                            |                      | 1.91±0.12                                                 | 2.67±0.21           |
| 30.01.2020      | 58879.106  |                                                            |                      | 2.11±0.12                                                 | 2.76±0.19           |
| 20.02.2020      | 58900.096  | 1.58±0.15                                                  | 16.9±1.5             | 2.14±0.12                                                 | 2.88±0.20           |
| 29.02.2020      | 58909.098  | 1.69±0.19                                                  | 17.2±1.8             |                                                           |                     |
| 13.03.2020      | 58922.089  | 1.72±0.16                                                  | 17.0±1.5             |                                                           |                     |

в апреле 2016г. [21].

Высокий уровень блеска V725 Тау в оптическом диапазоне сохранялся до 2019г. Тенденция к ослаблению проявилась в конце прошлого года.

В спектре V725 Тау наблюдаются эмиссионные линии H $\beta$ , HeI, 6678 Å, 7065 Å. Потоки излучения  $F$  и эквивалентные ширины EW эмиссионных линий H $\beta$  и H $\alpha$  приводятся в табл.3 и на рис.2 и 3.

Усиление потоков излучения в эмиссионных линиях началось в 2016г. Особенно эта тенденция заметна в поведении линии H $\beta$ . Высокий уровень интенсивности сохраняется и в 2020г., несмотря на быстрое падение блеска объекта.

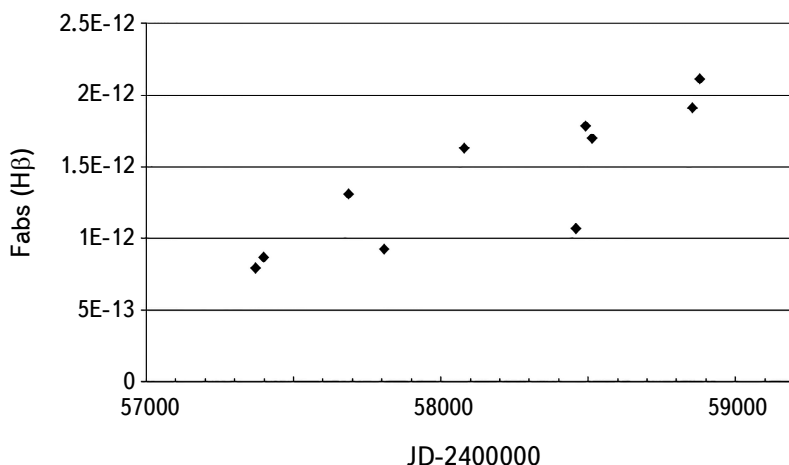


Рис.2. Изменение абсолютного потока в линии H $\beta$  в спектре V725 Тау.

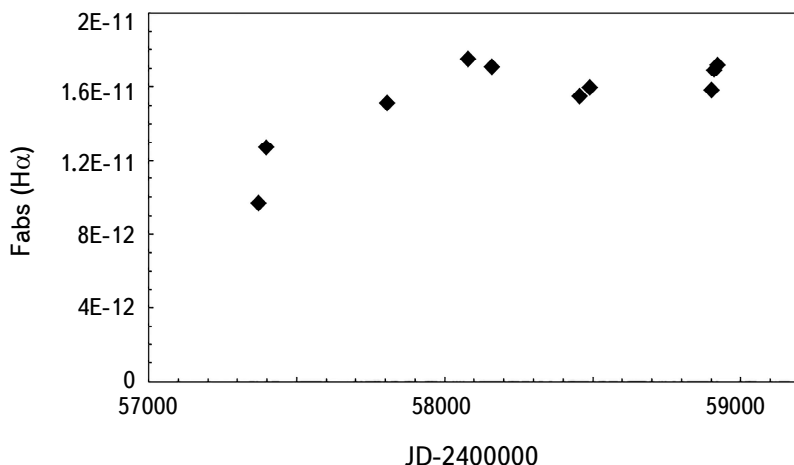


Рис.3. Изменение абсолютного потока в линии H $\alpha$  в спектре V725 Тау.

Профили линий  $H\beta$  и  $H\alpha$ , полученные в 2019г. не имеют особенностей (рис.4). Широкие крылья  $H\alpha$  простираются от  $-900$  км/с до  $+700$  км/с. Параметр FWHM составляет  $\sim 250$  км/с и  $350$  км/с для профилей  $H\beta$  и  $H\alpha$ , соответственно.

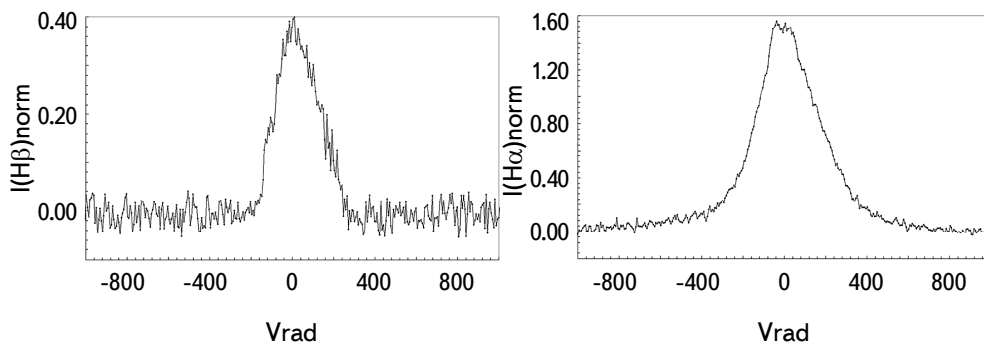


Рис.4. Профили эмиссионных линий  $H\beta$  (слева) и  $H\alpha$  (справа). Ось X - шкала гелио-центрических лучевых скоростей, ось Y - значения интенсивностей, нормированные к уровню непрерывного спектра.

4. *Заключение.* Результаты многочисленных исследований двойных звезд с рентгеновскими компонентами показывают, что, источником гигантских рентгеновских вспышек могут быть структурные изменения в околозвездном диске холодной компоненты. Активной стадии объекта предшествует длительный процесс увеличения массы и плотности околозвездного диска, особенно в его внешних зонах. Это проявляется в усилении потоков излучения в эмиссионных линиях. В какой-то момент происходит выброс газа во внутренние зоны диска, что приводит к падению оптического блеска объекта. При этом сохраняется высокий уровень излучения в эмиссионных линиях, которые формируются во внешних зонах околозвездного диска. В свою очередь высокая плотность газа во внешних зонах провоцирует усиление аккреционных процессов и наступление активной стадии [20,22]. Таким образом, изменение в структуре околозвездного диска является предшественником активности в рентгеновском диапазоне. В процессе самой вспышки большая масса газа из околозвездного диска передается нейтронной звезде. После этого происходит восстановление поврежденного диска.

В результате исследования объекта V725 Tau выявлены следующие изменения:

1. Высокий уровень блеска объекта сохранялся в течение трех лет, в конце 2019г. началось его понижение.
2. Начиная с 2016г., наблюдается постепенное увеличение потоков излучения в эмиссионных линиях  $H\beta$  и  $H\alpha$ .
3. Эквивалентные ширины этих линий ( $EW(H\alpha)=17\text{\AA}$ ,  $EW(H\beta)=2.9\text{\AA}$ )

пока не достигли значений ( $-25 \text{ \AA}$ ), зарегистрированных во время гигантской рентгеновской вспышки 2009г., но существенно превышают результаты ( $-10 \text{ \AA}$ ), полученные в процессе активной фазы 2011г. [17,20].

Именно такое сочетание значений параметров характерно для состояния объекта накануне начала активной фазы.

Работа поддерживается Программой целевого финансирования BR05336383 Аэрокосмического комитета Министерства обороны и аэрокосмической промышленности Республики Казахстан

Астрофизический Институт им. В.Г.Фесенкова, Алматы, Казахстан,  
e-mail: lu\_kondr@mail.ru

## PHOTOMETRIC AND SPECTROSCOPIC STUDY OF THE OBJECT Be/X-RAY BINARY V725 Tau = A0535 + 262

L.N.KONDRATYEVA, E.K.DENISSYUK, I.V.REVA, M.A.KRUGOV,  
G.K.AIMANOVA, A.V.KUSAKIN, B.K.OMAR

The paper presents the results of spectral and photometric observations of the binary system with the X-ray component V725 Tauri = A0535 + 262. It consists of a giant star HDE 245770 of spectral class O9.7 and pulsar A0535 + 26 with a pulsation period of  $\sim 103$  sec. The active stages of this object, accompanied by "giant" X-ray flashes, have been observed repeatedly. Recent events took place in 2009-2011. As a result of our study performed in 2017-2020, the following data were obtained: over the past three years, the brightness of the object in the *B* and *V* bands remained at a high level, at the end of 2019 its decline began. Moreover, from 2016 a gradual increase in the radiation fluxes in the  $H\beta$  and  $H\alpha$  emission lines is observed. At present, the equivalent widths of these lines exceed the values recorded during the giant X-ray flash of 2011. Previous researches have shown that a similar combination of the characteristics of a given object, namely, an increase in the radiation flux in the emission lines when the brightness is weakened, are recorded just before the beginning of an active stage.

Keywords: *variable stars: symbiotic stars: emission lines: individual: V725 Tauri*

## ЛИТЕРАТУРА

1. *P.Reig, J.Fabregat, M.Coe*, Astron. Astrophys., **322**, 193, 1997.
2. *P.Reig, P.Nersesian, A.Zezas et al.*, Astron. Astrophys., **590**, A122, 2016.
3. *I.Monageng, V.McBride, M.Coe et al.*, Mon. Not. Roy. Astron. Soc., **464**, 572, 2017.
4. *N.Haigh, M.Coe, J.Fabregat*, Mon. Not. Roy. Astron. Soc., **350**, 1457, 2004.
5. *M.Finger, R.Wilson, B.Harmon*, Astrophys. J., **459**, 288, 1996.
6. *R.Warwick, M.Watson, M.Sims*, Space Sci. Rev., **30**, 461, 1981.
7. *F.Nagase, S.Hayakawa, H.Kunieda et al.*, Astrophys. J., **263**, 814, 1982.
8. *S.Sembay, R.Schwartz, L.Orwig et al.*, Astrophys. J., **351**, 675, 1990.
9. *F.Makino, W.Cook, J.Grunsfeld et al.*, IAU Circ, **4769**, 1, 1989.
10. *J.Clark, A.Tarasov, I.Steele et al.*, Mon. Not. Roy. Astron. Soc., **294**, 165, 1998.
11. *J.Tueller, M.Ajello, S.Barthelmy*, ATel, **504**, 2005.
12. *M.Coe, P.Reig, V.McBride et al.*, Mon. Not. Roy. Astron. Soc., **368**, 447, 2006.
13. *I.Caballero, A.Santangelo, F.Kretschmar et al.*, Astron. Astrophys., **408**, L17, 2008.
14. *C.Wilson-Hodge, M.Finger, A.Camero-Arranz et al.*, ATel, **2324**, 2009.
15. *M.Reynolds, J.Miller*, Astrophys. J., **723**, 1799, 2010.
16. *T.Mihara, M.Nakajima, T.Yamamoto et al.*, ATel., **2970**, 2010.
17. *Y.Moritani, D.Nogami, A.Okazaki et al.*, arXiv:1105.4721, **1**, 2011.
18. *L.Kondratyeva, F.Rspaev, Ye.Aimuratov et al.*, News of the National Acad. of Sci. Republ. Kazakhstan, **5**, 12, 2016.
19. *A.Kharitonov, V.Tereschenko, L.Knyazeva*, Spectrophotometric catalog of stars, Almaty, 2011.
20. *A.Camero-Arranz, M.Finger, C.Wilson-Hodge et al.*, arXiv:1109.3924, **2**, 2012.
21. *W.Iwakiri, M.Serino, T.Takagi et al.*, ATel, **8977**, 2016.
22. *J.Yan, L.Hui, L.Qingzhong*, arXiv: 1111.0715, **1**, 2011.