

УДК 524.337

Исследование пекулярного объекта Кувано-Хонда (PU Vul) IV

Н.И. Бондарь, В.В. Бутковская, Р.Е. Гершберг, А.Г. Щербаков, В.А. Щербаков

Научно-исследовательский институт "Крымская астрофизическая обсерватория"

Поступила в редакцию 2 марта 2006

Аннотация.

Описаны наблюдения симбиотической новой звезды PU Vul (объект Кувано-Хонда), выполненные в 1985-1994 годы на спектрографах 2.6 м Шайновского рефлектора (ЗТШ) в Крыму и ОЗСП БТА Специальной астрофизической обсерватории РАН. Спектрограммы ОЗСП БТА и Кассегреновского спектрографа ЗТШ дают представление об эволюции спектра PU Vul в широких интервалах длин волн, а спектрограммы куде ЗТШ – об эволюции отдельных спектральных линий. Наблюдения перекрывают период медленного расширения оболочки вспыхнувшего компонента системы. Приведены регистрограммы спектров и таблицы с вероятными отождествлениями спектральных деталей и оценками их эквивалентных ширин. Анализ полученных данных приводит к выводу, что по мере расширения оболочки вспыхнувшего компонента уровень его фотосферы понижается, температура возрастает, что, с одной стороны, вызывает возбуждение высокотемпературных линий и появление запрещенных линий в среде низкой плотности и, с другой стороны, ослабление блеска вспыхнувшего компонента позволяет регистрировать фотосферное излучение холодного компонента системы. Иными словами, происходит формирование признаков симбиотичности PU Vul. Обсуждаются некоторые физические характеристики оболочки и особенности ее истечения.

INVESTIGATIONS OF THE KUWANO-HONDA PECULAR OBJECT (PU VUL). IV – by N.I.Bondar', V.V.Butkovskaya, R.E.Gershberg, A.G.Shcherbakov and V.A.Shcherbakov. Spectral observations of the symbiotic nova PU Vul (Kuwano-Honda object) in 1985-1994 are described. They were carried out with 3 spectral devices: Cassegrain spectrograms from the 2.6 m Shajn telescope and spectrograms from the main stellar spectrograph of the 6 m telescope of the Special Astrophysical Observatory show an evolution of the PU Vul wide wavelength intervals while coude spectragrams taken with the Shajn reflector demonstrate an evolution of separate spectral lines. The observations overlap a period of expansion of an envelope of an outbursting component of the system. Registograms of spectra and tables with probable identifications of spectral details and their estimated equivalent widths are given. Analysis of the data leads to conclusion that as the envelope is expanding a photospheric level of the outbursting component goes down, its temperature increases that leads to excitation of high-temperature lines as well as forbidden lines inherent in low-density medium. Brightness decrease of the outbursting component allows to detect a photospheric radiation of a cool component of the system. As a result, the PU Vul symbioticness features appear. Some physical characteristics of the envelope and features of its outflow process are discussed.

Ключевые слова: симбиотические новые звезды, объект Кувано-Хонда = PU Vul

1 Введение

Пекулярный объект Кувано-Хонда – это симбиотическая новая, вспыхнувшая в 1977 году в созвездии Лисички и получившая обозначение PU Vul. Будучи довольно яркой в максимуме, имея сравнительно медленный темп развития и удобное расположение для наблюдений в Северном полушарии, PU Vul подверглась наиболее детальному изучению среди всех переменных звезд этого типа.

В статье Гершберга (2000) дана подробная хронология развития PU Vul на протяжении почти 20 лет. В этом развитии можно выделить несколько характерных стадий: возгорание до мая 1979 года, устойчивое состояние высокой светимости в течение около года, 500-суточный глубокий минимум 1980-81 годов, состояние высокой светимости с очень медленным и плавным спадом видимого блеска в 1982-87 годы и последующая небулярная стадия с быстрым угасанием системы. На всех этих стадиях объект Кувано-Хонда интенсивно исследовался в Крымской астрофизической обсерватории – см. статьи Белякиной и др. (1982аб, 1984, 1985, 1990, 2000). В последней из них были приведены результаты крымских фотометрических, колориметрических, спектрофотометрических и поляризационных наблюдений в 1987-96 годы. В настоящей работе приводятся спектральные результаты, полученные нами по наблюдениям в 1985 – 1994 годы.

2 Наблюдения

В течение рассматриваемого интервала времени произошел переход PU Vul из состояния сверхгиганта в небулярную стадию. Этот процесс был немонотонным и длился несколько лет; по-видимому, такой переход впервые был зарегистрирован с исключительной детальностью. В частности, в течение этого времени в Крыму был получен весьма богатый спектральный наблюдательный материал. Общее распределение всех обсуждаемых ниже спектрограмм вдоль кривой блеска системы и кривой показателя цвета V-R представлено на рис.1.

Спектральные наблюдения PU Vul проводились на двух спектрографах 2.6 м Шайновского рефлектора (ЗТШ) КраО с помощью ПЗС камеры CCD-2000 Astromed Ltd, содержащей 576×380 элементов (Хуовелин и др., 1986), и фотографически на спектрографе ОЗСП БТА Специальной астрофизической обсерватории РАН.

Самые длительные наблюдения PU Vul были проведены в фокусе куде ЗТШ: в 1985-94 годы получено более 180 ПЗС куде спектрограмм, соответствующие даты отмечены на рис.1 звездочками. При этих наблюдениях за одну экспозицию перекрывался участок спектра в 31 \AA , при ширине входной щели спектрографа 0.4 мм ($0''.8$) спектральное разрешение составляло 0.3 \AA и в зависимости от качества изображений достигалось отношение сигнал/шум от 20 до 50. В таком режиме получены спектры в областях H_α , H_β , D линий натрия и гелия, инфракрасного триплета ионизованного кальция, линии HeI $\lambda 10830 \text{ \AA}$ и около двух десятков спектров в ряде других областей. Перечень полученных в фокусе куде спектрограмм, которые в той или иной степени вошли в дальнейший анализ, приведен в Таблице 1.

На ОЗСП БТА САО в 1989 и 1990 годы были получены несколько спектрограмм на фотоэмульсии в области от H_γ до H_β с дисперсией $28 \text{ \AA}/\text{мм}$; сведения о спектрограммах, полученных с хорошей плотностью и отобранных для количественного анализа, приведены в Таблице 2; даты их получения отмечены на рис.1 вертикальными штрихами.

Около трех десятков ПЗС спектрограмм PU Vul с дисперсией $69 \text{ \AA}/\text{мм}$ в диапазонах длин волн около 900 \AA в каждой экспозиции были получены на Шайновском рефлекторе с мая 1988 по сентябрь 1990 года с помощью дифракционного спектрографа в Кассегреновском фокусе. Эти спектрограммы перекрыли самый широкий диапазон длин волн спектра PU Vul: на их середины приходились линии K Ca II, H_β , D линии натрия и гелия, области $\lambda 6200 \text{ \AA}$, H_α , $\lambda 7300 \text{ \AA}$, $\lambda 8000 \text{ \AA}$ и $\lambda 8500 \text{ \AA}$. Сведения о 24 таких спектрограммах, отобранных для дальнейшего рассмотрения, приведены в Таблице 3; даты их получения отмечены на рис.1 буквой К.

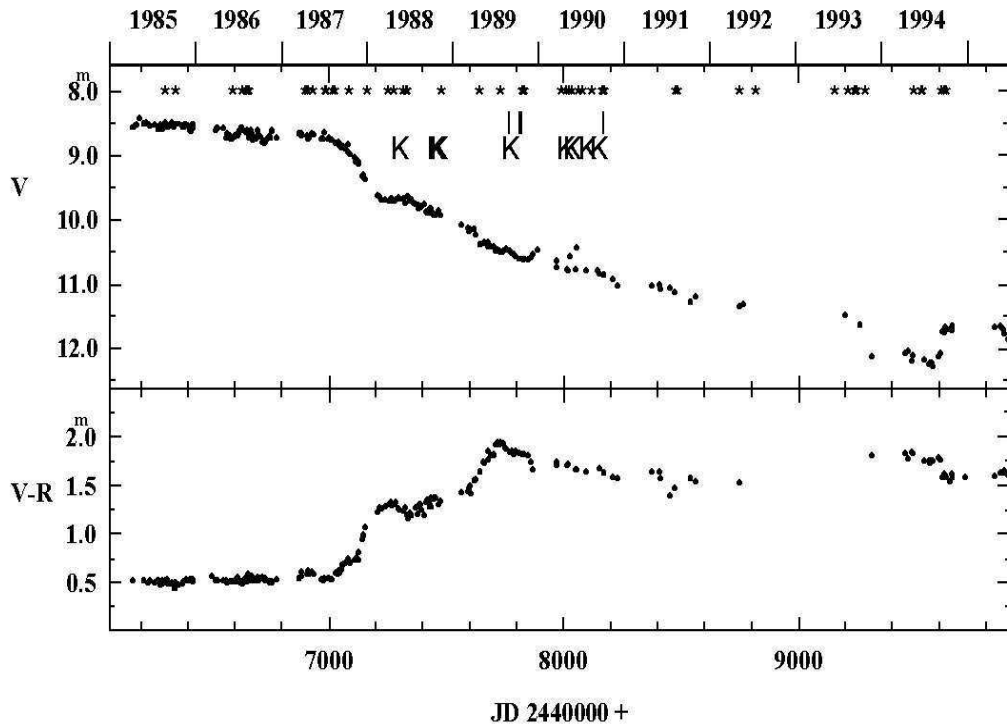


Рис. 1. Распределение спектрограмм PU Vul, полученных в различных спектральных областях на спектрографах ЗТШ и БТА, вдоль кривой блеска и кривой показателя цвета V-R системы.

3 Спектры PU Vul, полученные на ПЗС спектрографе в фокусе Кассегрена ЗТШ

Для получения на ЗТШ спектральных данных с промежуточным разрешением между высоко дисперсионными спектрами, которые дает спектрограф куде, и спектрами низкого разрешения, регистрируемыми на спектрографе СПЭМ в фокусе Нэсмита, во второй половине 80-х годов в оптической и механической мастерских КраО был изготовлен дифракционный спектрограф для фокуса Кассегрена. В нем были установлены светосильная камера системы Попова-Боуэна и ПЗС матрица в качестве детектора. Как уже упоминалось, в этом спектрографе за одну экспозицию перекрывался диапазон длин волн в 900 \AA при дисперсии 69 \AA/мм и вращением решетки этот диапазон мог быть установлен на длины волн от ультрафиолета до ближней инфракрасной области.

На рис.2 дана схема перекрытия спектра PU Vul Кассегреновскими спектрограммами, полученными в течение 11 ночей и перечисленными в Таблице 3. Запись и обработка спектрограмм, включающая очистку записей от регистраций космических частиц, учет неравномерности чувствительности поля ПЗС матрицы, вычитание фона неба и приведение к континууму, выполнялись с помощью пакета программ SPE, разработанного в КраО С.Г.Сергеевым. Спектральное разрешение полученных спектров в зависимости от применявшейся ширины входной щели составляло $4-6 \text{ \AA}$.

Все спектры PU Vul были получены на Кассегреновском спектрографе в ходе длительных рабочих испытаний и одновременно проводившейся доработки прибора. К сожалению, эти испытания выявили два его существенных недостатка.

Для калибровки спектрограмм по длинам волн дисперсионные кривые строились в виде полиномов второго порядка по 6-8, а в некоторых случаях и по 3-4 линиям спектра сравнения.

Таблица 1. ПЗС наблюдения на спектрографе куде Шайновского рефлектора

| Дата | JD 2440000+ | Спектральная область | Наблюдатели |
|----------|----------------|--|----------------------------|
| 23-08-85 | 6301 | H α | П.П.Петров |
| 06-10-85 | 6345 | H α | П.П.Петров |
| 06-06-86 | 6588 | H α | П.П.Петров |
| 17-07-86 | 6629 | H α | П.П.Петров |
| 01-08-86 | 6644 | H α , D линии, λ 5684 | И.С.Саванов |
| 02-08-86 | 6645 | H α , λ 5684 | И.С.Саванов |
| 07-08-86 | 6650 | H α | И.С.Саванов |
| 08-08-86 | 6651 | H α | И.С.Саванов |
| 09-08-86 | 6652 | H α , H β | И.С.Саванов |
| 10-08-86 | 6653 | λ 4934 BaII | И.С.Саванов |
| 12-08-86 | 6655 | D линии | П.П.Петров |
| 13-08-86 | 6656 | H α , λ 5854 BaII | П.П.Петров |
| 14-08-86 | 6657 | H α , IR CaII, λ 6448 ScI, LaI | П.П.Петров |
| 10-04-87 | 6896 | H α | П.П.Петров |
| 20-04-87 | 6906 | H α , H β | П.П.Петров |
| 23-04-87 | 6909 | IR CaII | П.П.Петров, А.Г.Щербаков |
| 16-05-87 | 6932 | H α | А.Г.Щербаков |
| 03-07-87 | 6980 | H α | И.С.Саванов |
| 04-07-87 | 6981 | IR CaII | П.П.Петров |
| 07-07-87 | 6984 | H α | А.Е.Тарасов |
| 06-08-87 | 7014 | D линии | П.П.Петров |
| 07-08-87 | 7015 | H α , IR CaII | П.П.Петров |
| 14-08-87 | 7022 | H α , IR CaII | П.П.Петров |
| 15-10-87 | 7084 | H α , H β , D линии, λ 6448 ScI, LaI | А.Г.Щербаков |
| 02-01-88 | 7163 | H α , H β , D линии | И.С.Саванов |
| 27-03-88 | 7248 | H α , H β | И.С.Саванов и П.П.Петров |
| 20-04-88 | 7272 | H α , H β | И.С.Саванов |
| 01-06-88 | 7314 | H α , D линии | И.С.Саванов |
| 16-06-88 | 7329 | H α , D линии | И.С.Саванов |
| 13-11-88 | 7479 | H α | И.С.Саванов |
| 21-04-89 | 7638 | H α | А.Е.Тарасов |
| 20-07-89 | 7728 | H α | И.С.Саванов |
| 24-10-89 | 7824 | H α | И.С.Саванов |
| 25-10-89 | 7825 | H α | И.С.Саванов, С.И.Росточин |
| 30-10-89 | 7830 | H α | И.С.Саванов |
| 05-04-90 | 7987 | H α | А.Г.Щербаков |
| 29-04-90 | 8011 | H α | Р.Е.Гершберг, Г.А.Гарбузов |
| 09-05-90 | 8021 | H α , IR CaII | С.И.Плачинда, А.Г.Щербаков |
| 10-05-90 | 8022 | IR CaII | С.И.Плачинда, А.Г.Щербаков |
| 20-05-90 | 8032 | H α , H β , D линии, IR CaII | Р.Е.Гершберг, Г.А.Гарбузов |
| 19-06-90 | 8062 | H α , IR CaII | И.С.Саванов |
| 03-07-90 | 8076 | H α | И.С.Саванов, А.Г.Щербаков |
| 04-07-90 | 8077 | H α , D линии | И.С.Саванов |
| 07-07-90 | 8080 | H α | И.С.Саванов |
| 13-08-90 | 8117 | H α , D линии | И.С.Саванов |
| 15-08-90 | 8119 | H α , D линии | А.Г.Щербаков |
| 29-09-90 | 8164 | H α , D линии, H β | С.И.Плачинда, И.С.Саванов |
| 30-09-90 | 8165 | H α , [N II], D линии, λ 6678 HeI | С.И.Плачинда, И.С.Саванов |
| 04-10-90 | 8169 | H α , D линии, [N II], H β | С.И.Плачинда, И.С.Саванов |

Таблица 1 (окончание)

| Дата | JD 2440000+ | Спектральная область | Наблюдатели |
|----------|----------------|---|----------------------------|
| 05-10-90 | 8170 | H $_{\alpha}$, H $_{\beta}$, λ 6305 | С.И.Плачинда, И.С.Саванов |
| 06-10-90 | 8171 | H $_{\alpha}$, D линии, [N II] | С.И.Плачинда, И.С.Саванов |
| 07-10-90 | 8172 | H $_{\alpha}$, D линии, [N II] | С.И.Плачинда, И.С.Саванов |
| 09-08-91 | 8478 | H $_{\alpha}$ | А.Г.Щербаков |
| 14-08-91 | 8483 | H $_{\alpha}$ | А.Г.Щербаков |
| 05-05-92 | 8748 | H $_{\alpha}$ | И.С.Саванов |
| 06-05-92 | 8749 | H $_{\alpha}$ | И.С.Саванов |
| 11-07-92 | 8815 | H $_{\alpha}$ | И.С.Саванов |
| 15-06-93 | 9154 | H $_{\alpha}$ | И.С.Саванов |
| 10-08-93 | 9210 | H $_{\alpha}$, λ 5007, D линии | И.С.Саванов |
| 11-08-93 | 9211 | H $_{\alpha}$, λ 5007 | И.С.Саванов |
| 08-09-93 | 9239 | H $_{\alpha}$, λ 10830 | А.Г.Щербаков |
| 09-09-93 | 9240 | H $_{\alpha}$, H $_{\beta}$, D линии, λ 10830 | А.Г.Щербаков |
| 11-09-93 | 9242 | H $_{\alpha}$, H $_{\beta}$, H $_{\gamma}$, D линии | А.Г.Щербаков |
| 14-09-93 | 9245 | H $_{\alpha}$ | А.Г.Щербаков |
| 15-09-93 | 9246 | H $_{\alpha}$, H $_{\beta}$, D линии, λ 10830 | А.Г.Щербаков |
| 16-09-93 | 9247 | H $_{\alpha}$, D линии, λ 10830, λ 4352 Ar II | А.Г.Щербаков |
| 22-10-93 | 9283 | H $_{\alpha}$, H $_{\beta}$, D линии, λ 10830 | А.Г.Щербаков, В.А.Щербаков |
| 19-05-94 | 9492 | H $_{\alpha}$ | И.С.Саванов |
| 18-06-94 | 9522 | H $_{\alpha}$, D линии | А.Г.Щербаков |
| 20-06-94 | 9524 | H $_{\alpha}$, H $_{\beta}$ | А.Г.Щербаков |
| 22-06-94 | 9526 | H $_{\alpha}$, λ 10830 | А.Г.Щербаков |
| 11-09-94 | 9607 | H $_{\alpha}$, D линии | А.Г.Щербаков |
| 23-09-94 | 9619 | λ 10830 | А.Г.Щербаков |
| 04-10-94 | 9630 | H $_{\alpha}$, D линии, λ 10830 | А.Г.Щербаков |

Таблица 2. Фотографические наблюдения PU Vul на ОЗСП БТА

| Дата | JD 2440000+ | Наблюдатели |
|----------|----------------|---------------|
| 25-07-89 | 7733 | Н.И.Шаховская |
| 14-10-89 | 7814 | В.Д.Бычков |
| 15-10-89 | 7815 | В.Д.Бычков |
| 16-10-89 | 7816 | В.Д.Бычков |
| 17-10-89 | 7817 | Е.Л.Ченцов |
| 08-10-90 | 8173 | В.Г.Елькин |

Однако, различия в оценках длин волн одних и тех же линий на разных спектрограммах достигали нескольких ангстрем. По-видимому, причиной тому была недостаточная жесткость конструкции спектрографа, из-за чего при его различных ориентациях в пространстве имели место дифференциальные смещения элементов его оптической схемы. Поэтому найденные по спектру сравнения калибровочные кривые уточнялись по уверенно отождествляемым линиям водорода, гелия, ионизованного кальция. Последующее отождествление слабых спектральных линий проводилось на интервалах в 7-8 Å. Очевидно, что при такой калибровке определяются только

Таблица 3. ПЗС наблюдения PU Vul на Кассегреновском спектрографе Шайновского рефлектора

| Дата | JD 2440000+ | Спектральная область | Наблюдатели |
|----------|----------------|---|---|
| 20-05-88 | 7302 | λ 6200 | В.И.Проник, С.Г.Сергеев, И.С.Саванов |
| 23-10-88 | 7458 | λ 7300, λ 8000 | В.И.Проник, С.Г.Сергеев, И.С.Саванов, В.П.Гринин |
| 05-11-88 | 7471 | H_{α} , К CaII | В.И.Проник, С.Г.Сергеев, И.С.Саванов |
| 03-09-89 | 7773 | H_{β} , λ 8000 | В.И.Проник, С.Г.Сергеев, Р.Е.Гершберг |
| 26-04-90 | 8008 | H_{α} | Те же |
| 28-04-90 | 8010 | H_{α} , H_{β} , λ 8500 | Те же |
| 24-05-90 | 8036 | H_{α} , К CaII | Те же |
| 25-05-90 | 8037 | λ 8500 | Те же |
| 28-07-90 | 8101 | H_{α} , H_{β} , D линии, λ 8500, К CaII | Те же |
| 15-09-90 | 8150 | H_{β} , H_{α} , К CaII, λ 8500 | Те же |
| 16-09-90 | 8151 | D линии | Те же и Ю.Ф.Мальков |

лабораторные длины волн и теряется информация об абсолютных движениях и кинематической стратификации расширяющейся оболочки.

Второй обнаруженный существенный недостаток Кассегреновского спектрографа – это заметные ошибки в оценках эквивалентных ширин сильных эмиссионных линий: сопоставление близких по времени спектров показало, что величины этих ширин на Кассегреновских спектрограммах систематически и существенно превышают соответствующие величины на спектрограммах ОЗСП БТА.

Эти недостатки Кассегреновского спектрографа существенно снизили качество получаемых данных при всех наблюдениях, а не только PU Vul. И поскольку ни устранить эти недостатки, ни должным образом учитывать их при обработке спектрограмм не удалось, то прибор был снят с эксплуатации. Однако, учитывая уникальность вспышки PU Vul, мы сочли целесообразным тщательно проанализировать спектры этого объекта, поскольку Кассегреновские спектрограммы перекрывают довольно широкие диапазоны длин волн и охватывают значительно больший временной интервал, чем спектры ОЗСП БТА. Так, первый спектр в Кассегреновском фокусе ЗТШ был получен на 14 месяцев раньше первой спектрограммы ОЗСП БТА, и это упреждение оказалось существенным для отслеживания эволюции PU Vul. Поэтому даже чисто качественные результаты, которые можно извлечь из Кассегреновских спектров, представляют определенный интерес. Согласно крымским фотометрическим измерениям (Белякина и др., 2000), спектральные наблюдения PU Vul на Кассегреновском спектрографе перекрывают интервал времени, в течение которого в полосах UBVRI система ослабела на 0^m87 , 0^m98 , 1^m14 , 0^m76 и 0^m76 соответственно.

На рис.2 четыре прямоугольника и три многоугольника очерчивают спектрограммы, регистрограммы которых представлены на рис.3-9, а отождествление спектральных линий внутри этих фигур дано в таблицах 4-10 соответственно. Записи спектров, полученных в течение одной ночи, были усреднены. В таблицах приводятся лабораторные длины волн, обозначения элементов, степени их ионизации, номера мультиплетов и эквивалентные ширины линий для каждой даты наблюдений. Абсорбционные детали отмечены буквой “а”. Эти рисунки и таблицы наглядно показывают спектральную переменность PU Vul в рассматриваемый период.

На всех Кассегреновских спектрограммах в диапазоне длин волн от 3703 до 9012 ÅÅ были выделены два десятка абсорбционных и 220 эмиссионных линий или их blends. Из-за неуверенных определений длин волн этих деталей однозначное отождествление было возможно лишь для

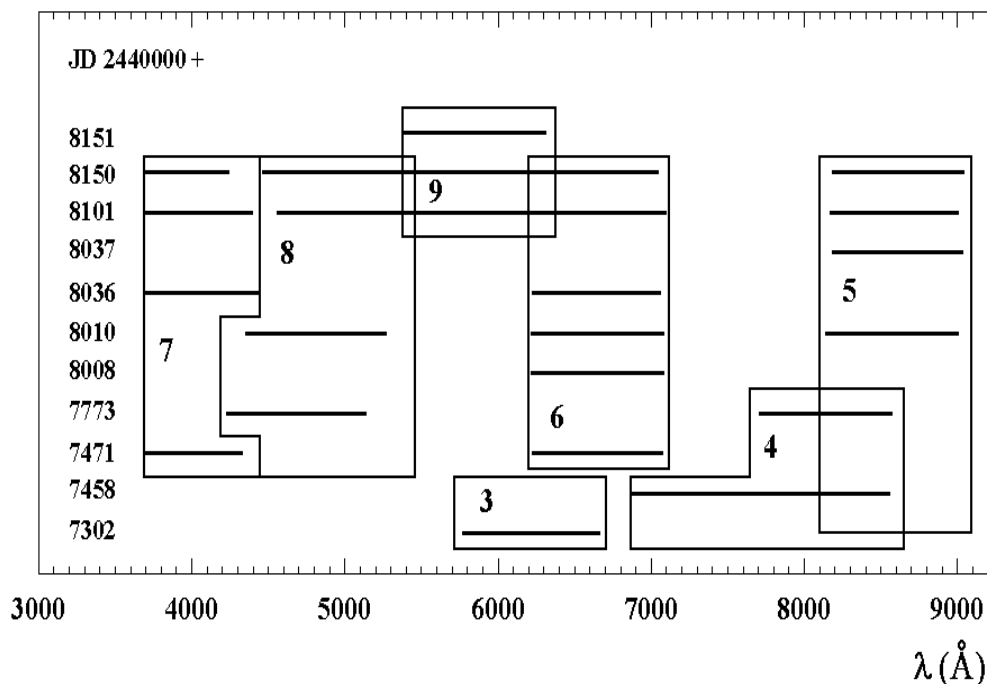


Рис. 2. Схема перекрытия спектра PU Vul кассегреновскими спектрограммами. Цифры 3 – 9 соответствуют нумерации последующих рисунков.

нескольких самых сильных из них, для слабых линий из Таблиц Шарлотты Мур (1945) выбирались такие кандидаты на отождествление, которые соответствовали наиболее сильным компонентам в мультиплетах разрешенных линий и запрещенным линиям, возбуждаемым только с нижних уровней атомов и ионов. Таким образом были отобраны более 1200 кандидатов на отождествления, относящиеся к 100 различным нейтральным атомам и ионам разной степени ионизации, в среднем по 4 кандидата на каждую абсорбционную деталь и около 6 – на каждую эмиссионную деталь; запрещенные линии составили 1/3 вероятных отождествлений эмиссионных деталей. Но несмотря на эти неопределенности, рассмотрение Кассегреновских спектров позволяет получить качественную картину развития спектра PU Vul в 1988-90 годы. Эта общая картина такова.

На первом спектре PU Vul, полученном в Кассегреновском фокусе ЗТШ в мае 1988 года (JD ...7302) в желто-красной области, на фоне абсорбционного спектра видна единственная эмиссия – мощная линия H_{α} , накладывающаяся на широкую линию поглощения – см.рис.3. Среди абсорбционных линий наиболее заметны D линии натрия и гелия и слабые линии поглощения SiI и SiII, ScI и ScII, BaI и BaII, OI, NI, VI, MnI, SII, FeII – см. Таблицу 4.

Через 5 месяцев, в октябре того же года (JD ...7458), был зарегистрирован спектр PU Vul в ближней инфракрасной области – см.рис.4 и 5. В диапазоне длин волн от 6940 до 8550 Å четко видна лишь одна абсорбционная деталь – широкая бледа линий нейтрального кремния около λ 7200 Å – и пять десятков эмиссионных линий, среди которых преобладают линии водорода и, согласно большому числу вероятных кандидатов на отождествление, разрешенные линии нейтральных атомов кислорода, азота и кремния и запрещенные линии нейтрального железа и ионизованных металлов – титана, ванадия, железа, циркония и хрома – см.Таблицу 5 и первый столбец Таблицы 6. Сосуществование абсорбционной кремниевой детали и запрещенных линий металлов свидетельствует о существенной стратификации физических условий в излучающем источнике.

Через две недели, JD ...7471, наблюдения PU Vul были проведены в области H_{α} и в коротковолновой области спектра – см.нижние регистрограммы на рис.6 и 7 и соответствующие

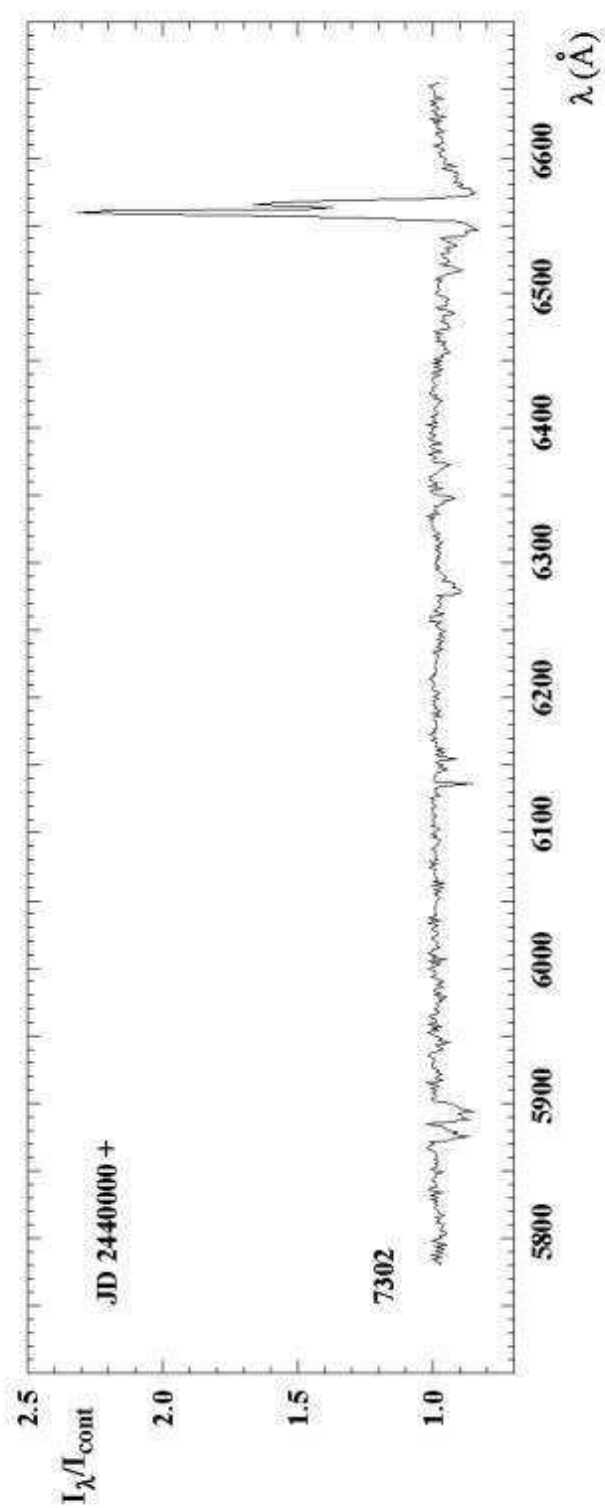


Рис. 3. Регистрограмма касегреновской спектрограммы в желто-красной области спектра PU Vul.

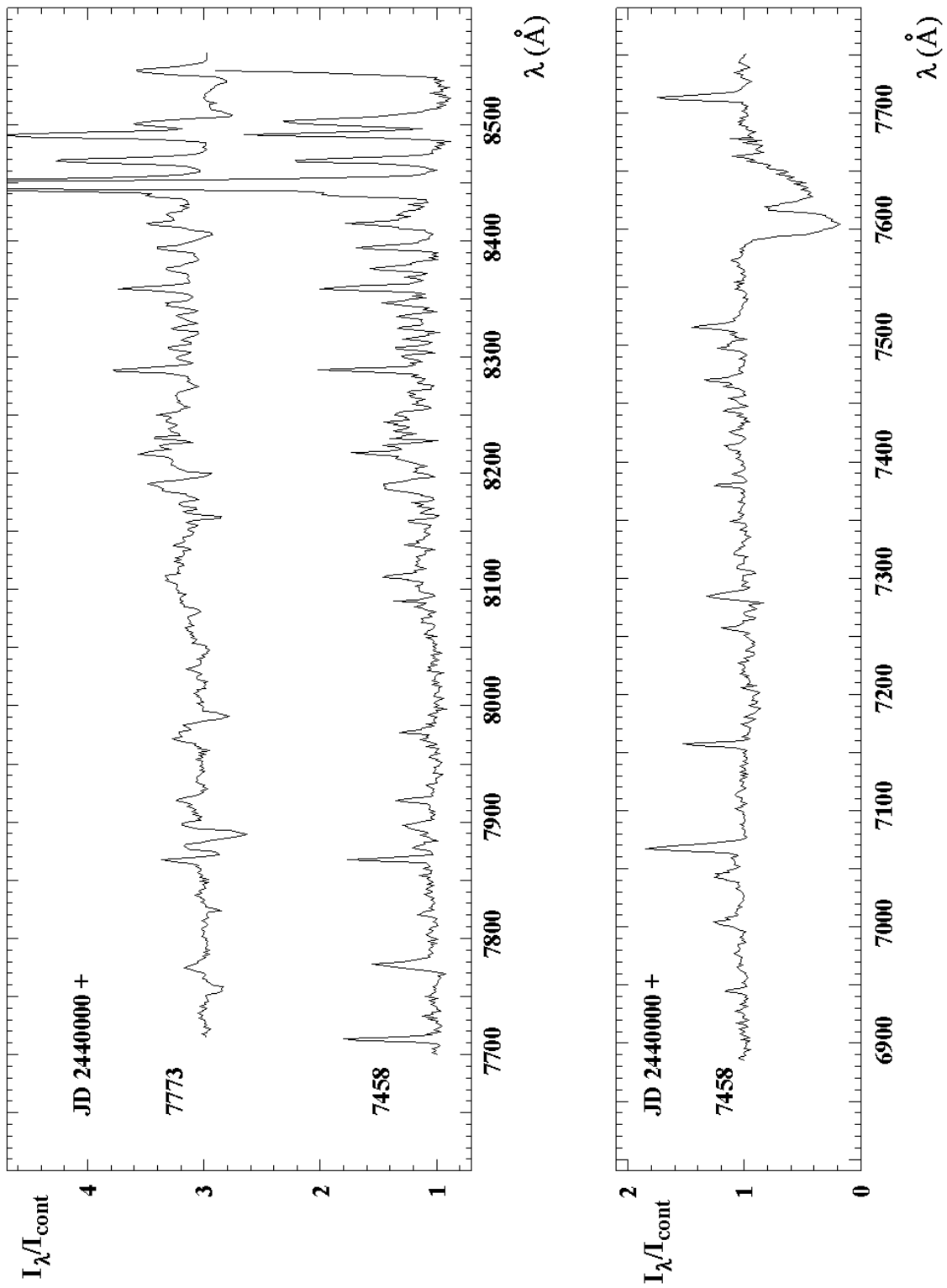


Рис. 4. Регистрограммы кассегреновских спектрограмм в ближней инфракрасной области спектра PU Vul.

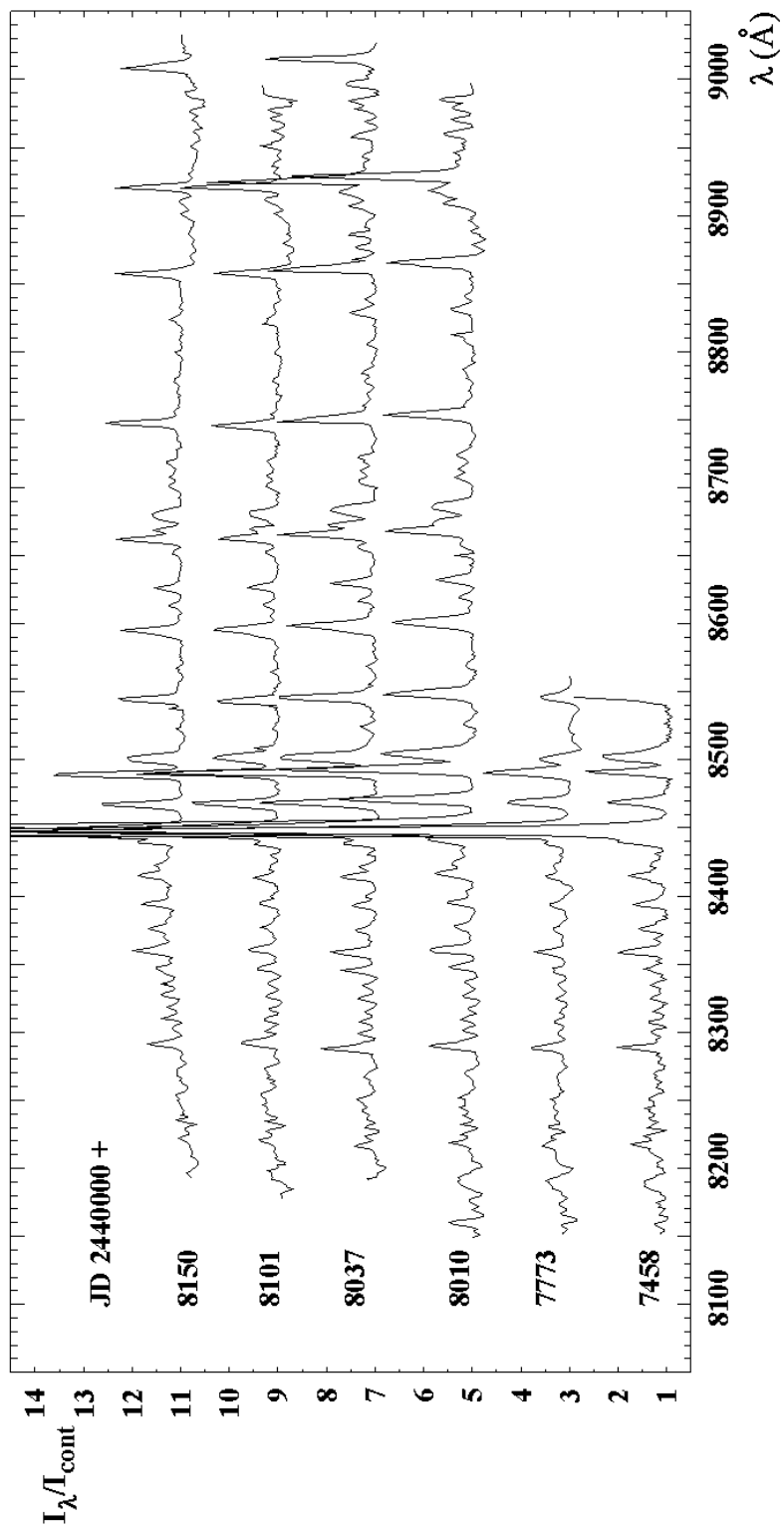


Рис. 5. Регистрограммы касегреновских спектрограмм в инфракрасной области спектра PU Vul.

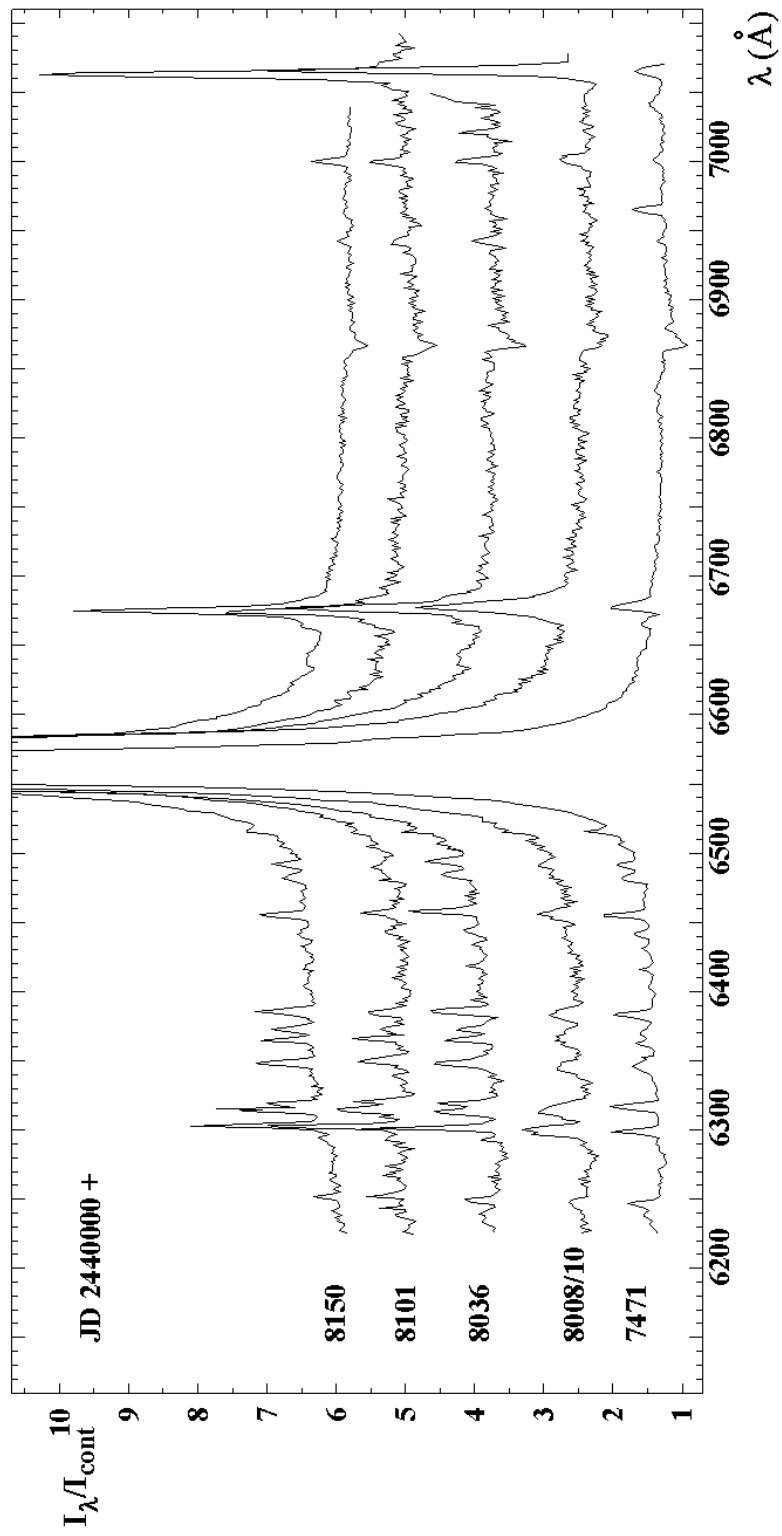


Рис. 6. Регистрограммы касегреновских спектрограмм PU Vul в области H α .

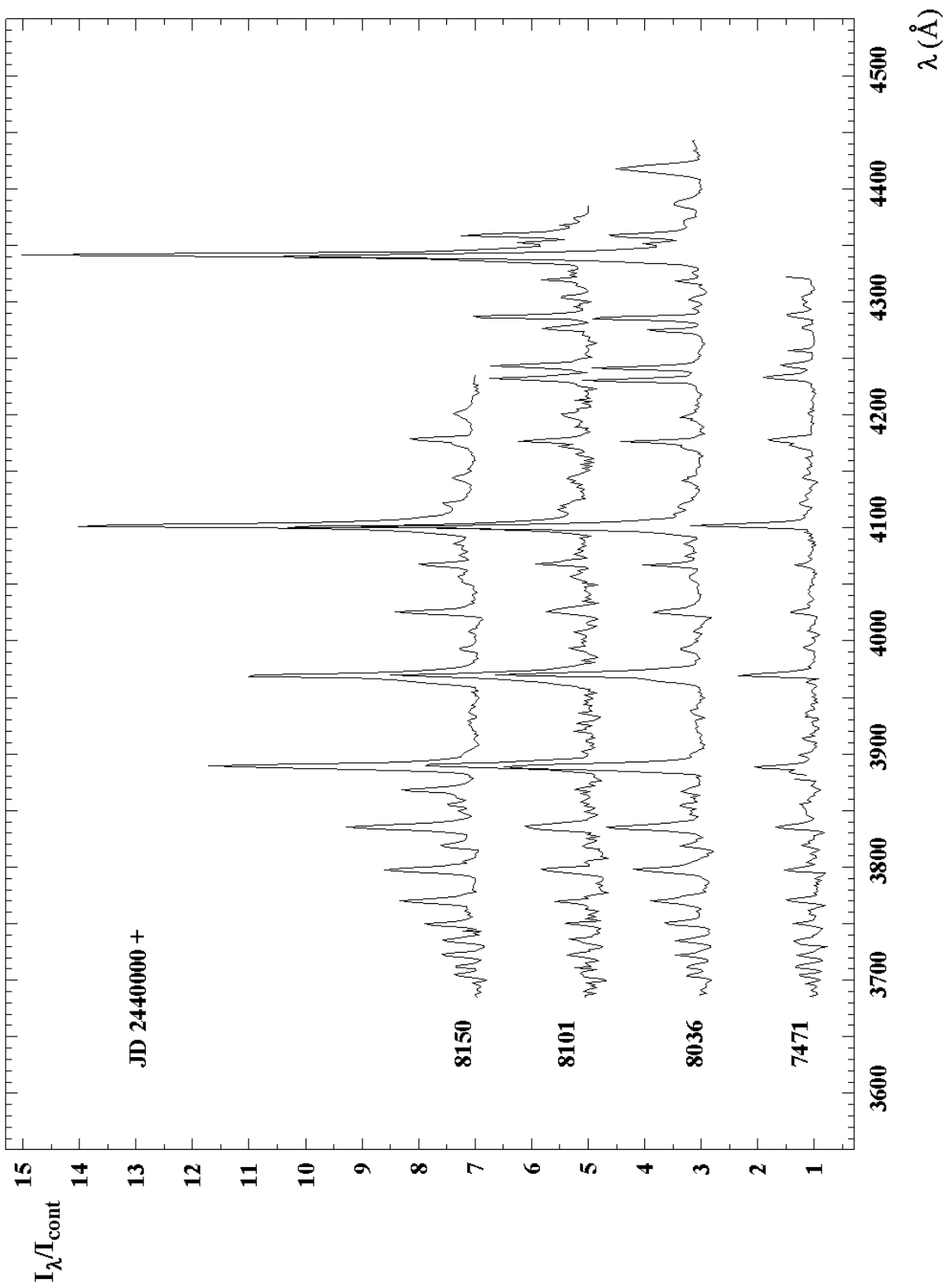


Рис. 7. Регистрограммы кассегреновских спектрограмм в коротколновой области спектра PU Vul.

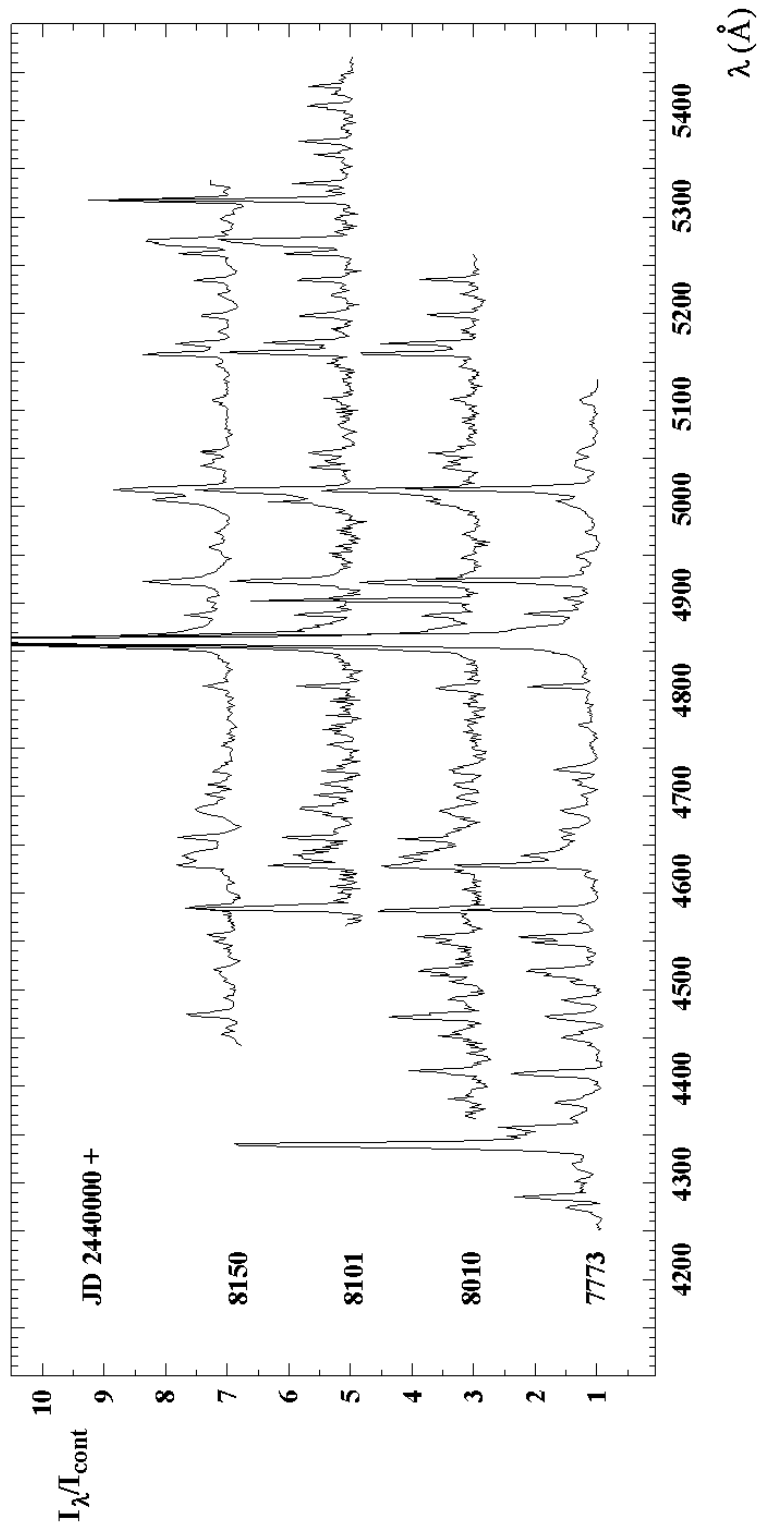


Рис. 8. Регистрограммы кассегреновских спектрограмм в сине-зеленой области спектра PU Vul.

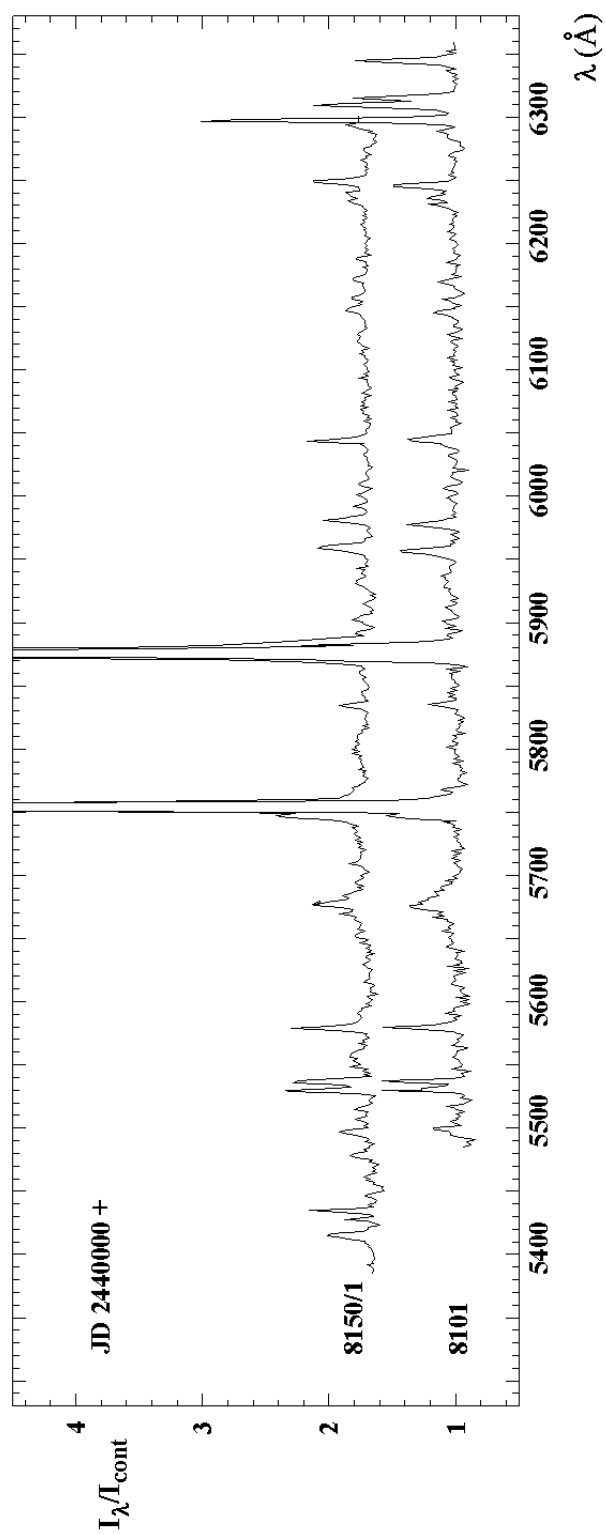


Рис. 9. Регистрограммы кассегреновских спектрограмм в желтой области спектра PU Vul.

Таблица 4. ПЗС наблюдения на Кассегреновском спектрографе Шайновского рефлектора
диапазон длин волн 5780-6650 Å

| Дата JD 2440000 + | элемент, состояние ионизации, номер мультиплета | | | эквивалентная ширина (Å) |
|------------------------------------|--|-------------------------------------|--|-----------------------------|
| | | | | 20.5.88 7302 |
| лабораторная длина волны (Å) | | | | |
| 5800.2 | BaI(9) | 01.2, 05.8 CI(18) | 05.8, 08.3 LaII(4) | <1a |
| 5875.6 | HeI (11) | | | <1a |
| 5889.9 | NaI (1) | | | |
| 5895.9 | NaI (1) | | | 1.6a |
| 5948.6 | SiI(16) | | | <1a |
| 6135.8 | BaII(12) | | | <1a |
| 6141.7 | BaII(2) | 45.1, 55.2 SiI(29) | 46.5 LaII(4) 54.2, 60.7 NaI(5) | |
| | | 56.0, 56.8, 58.2 OI(10) | 61.2, 65.9 PrII(39) 62.2 CaI(3) | <1a |
| 6237.6, | 44.6 SiI(27) | 39.6 FI(3) | 39.8, 44.5 ScI(3) 42.8, 43.1 VI(19) | |
| | 43.4 AlI(10) | 43.9 SiI(28) | 45.6 ScII(28) 49.9 LaI(7) | <1a |
| 6274.7, | 85.2, 92.9 VI(19) | 78.3 AuI(1) | 79.8 ScII(28) 82.6 CoI(37) | 1.2a |
| 6341.7 | BaI(6) | 47.1 SiII(2) | 48.5 FI(3) 49.7, 56.1 MnI(39) | <1a |
| 6369.3 | SII(19) | 69.4 FeII(40) | 71.4 SiII(2) 78.8 ScI(1) 78.9 BaII(12) | <1a |
| 6411.0 | LaI(7) | 13.4 ScI(1) | 13.7 FI(3) 13.7 SII(19) 13.9 MnI(39) | <1a |
| 6450.2 | CoI(37) | 50.9 BaI(6) | 52.4 VI(48) 53.6, 54.5, 56.0 OI(9) | |
| | 55.6 CaI(19) | 56.0 LaI(1) | 57.9 NI(22) 62.6 CaI(18) | <1a |
| 6468.3 | NI(22) | 81.7, 82.7, 83.8, 84.9, 91.3 NI(21) | 91.7 MnI(39) 93.8 CaI(18) | <1a |
| 6496.9 | BaII(2) | 98.8 BaI(6) | | <1a |
| 6516.1 | FeII(40) | 19.4 MnI(39) | | <1a |
| 6562.8 | H α | | | 8a |

столбцы таблиц 7 и 8. На рис.6 доминирует эмиссия H α ; кроме нее видны еще две дюжины эмиссионных деталей и сильная абсорбция в области λ 6870 Å, обусловленная, по-видимому, ионизованным барьером. Среди эмиссий наиболее вероятны разрешенные линии NI и NII, OI, FI, SII, SiII, MnI, FeII и запрещенные линии TiII, VII, FeII, CrI, NiI и NiII и ZrII. Сильная эмиссия [OI] обусловлена свечением ночного неба. Сравнение этой регистрограммы с первым Кассегреновским спектром PU Vul позволяет заподозрить обращение за 169 суток ряда мультиплетов – NI(21,22), OI(9), FI(3), SiI(27), SiII(2), SII(19), CaI(18,19), ScI(1,3), ScII(28), VI(19), MnI(39), FeII(40), BaII(2) и LaI(1,7) - из абсорбционных в эмиссионные.

В коротковолновом диапазоне длин волн спектра PU Vul, зарегистрированном в ту же дату JD ... 7471, нет абсорбционных деталей и доминирует эмиссия Бальмеровской серии водорода от H $_{16}$ до H $_{\delta}$ – см.рис.7. Кроме того, видна дюжина других эмиссионных деталей, которые с разной степенью уверенности можно отождествить с разрешенными линиями HeI, OII, CaI, MgII, MnI, TiI, TiII, VI, VII, NdII и запрещенными линиями FeI и FeII. Уверенно отождествляемая эмиссия небулярного дублета [SII] λ 4069/76 Å свидетельствует о существовании в расширяющейся оболочке областей с очень низкой электронной плотностью. Заметную эмиссию около λ 4025 Å можно отождествить с линией HeII(3), но другой компонент этого мультиплета около λ 4025 Å очень слаб, что ставит под сомнение такое отождествление. Тем не менее, среди кандидатов на отождествление находятся линии высокоионизованных ионов OV, NeIII, FeIII, FeV, CaV, FIV, которые, как и HeII, могут возникать только в условиях высокотемпературного излучения.

В сентябре 1989 года - JD ...7773 – на Кассегреновском спектрографе были получены спектрограммы PU Vul в сине-зеленой и ближней ИК областях; регистрограмма ИК диапазона приведена на рис.4 и 5, сине-зеленая область – на рис.8, количественные данные – в таблицах 6 и 9 соответственно. Как показывают две нижние регистрограммы на рис.5 и соответствующие

Таблица 5. ПЗС наблюдения на Кассегреновском спектрографе Шайновского рефлектора

| диапазон длин волн 6900-7750 Å | | | | | | | |
|--------------------------------|---|--------------------|-------------------|----------------|--------------|--------------------------|----------|
| Дата | | | | | | | 23.10.88 |
| JD 2440000 + | | | | | | | 7458 |
| лабораторная длина волны (Å) | элемент, состояние ионизации, номер мультиплета | | | | | эквивалентная ширина (Å) | |
| 6941.6 | NiI(2F) | 42.9 NII(53) | 44.9 FeII(43F) | 45.2 FeI(111) | 45.2 NI(29) | <1 | |
| 7000.0, | 04.0 TiII(17F) | 01.9, 02.2 OI(21) | 02.0 NiI(2F) | 03.0 NII(53) | | | |
| | 03.6, 05.8 SiI(60) | | | | | 1.9 | |
| 7051.0, | 55.0 TiII(17F) | 51.7 CrIV(1F) | 54.4 NiII(8F) | 59.9 BaI(5) | | 2.3 | |
| 7065.2, | 65.7 HeI(10) | 66.1 ZrII(15F) | 66.2 LaII(1) | 67.2 AlI(1) | 68.4 LaI(1) | 5.6 | |
| 7154.7 | CoI(89) | 55.1 FeII(14F) | 56.3 ZrII(5F) | 56.9 ZrII(20F) | | | |
| | 58.4 FeI(14F) | | | | | 1.7 | |
| 7193.6, | 93.9 SiI(25) | | | | | 2.5a | |
| 7235.3 | SiI(26) | 35.9 SiI(25) | 36.2 CII(3) | | | 1.4a | |
| 7250.7 | SiI(25) | 52.5 CrV(1F) | 54.2, 54.5 OI(20) | 56.2 NiII(7F) | 56.6 CII(5) | <1 | |
| 7281.3 | HeI(45) | 81.7 FeII(30F) | 82.4 LaII(1) | | | 1.7 | |
| 7373.3 | VII(4F) | 79.6 NiII(2F) | | | | <1 | |
| 7405.8, | 09.1 SiI(23) | 06.2 YII(25) | 06.6 FeI(14F) | 11.9 VII(4F) | | 1.0 | |
| 7421.5 | CoII(3F) | 23.5, 24.6 SiI(23) | 23.6 NI(3) | 25.6 FI(1) | | <1 | |
| 7439.6 | FeI(28F) | 40.6 VII(3F) | 42.3 NI(3) | 44.8 ZrII(3F) | | <1 | |
| 7449.4 | FeII(30F) | 50.3 YII(25) | 52.5 FeII(14F) | 54.8 ZrII(5F) | | <1 | |
| 7467.0 | CoII(3F) | 68.3 NI(3) | 68.5 VII(4F) | 69.4 VII(3F) | 70.1 YII(4F) | | |
| | 71.4 AlII(21) | | | | | 2.2 | |
| 7497.7 | VII(3F) | | | | | 1.3 | |
| 7514.9 | FI(1) | 15.1 VII(4F) | 18.4 VII(29F) | 18.8 ZrII(4F) | | 3.0 | |
| 7708.8 | FeI(1F) | 10.8 FeII(30F) | 11.7 FeII(73) | 12.7 CoI(126) | | 3.4 | |

столбцы таблицы 6, за 10 месяцев качественные изменения в ИК области спектра PU Vul не произошли. В сине-зеленой области, кроме доминирующих эмиссий H_γ и H_β и многочисленных линий HeI, можно заподозрить много разрешенных и запрещенных линии FeI и FeII, эмиссии OII, NII и NIII, NeI, PII, CaI, TiI и TiII, VI и VII, CrII, MnI, CoI, ZrI. Обращает на себя внимание среди кандидатов на отождествление большое число линий редких элементов – Y, La, Ce, Pr, Nd. (Это напоминает эмиссионный спектр PU Vul во время выхода системы из глубокого минимума 1980-81 годов (Белякина и др., 1985)). Можно с уверенностью констатировать присутствие в спектре линии HeII λ 4686 Å, небулярного дублета [OIII] λ 4959/5007 Å и, вероятно, авроральной линии [OIII] λ 4363 Å, которые возникают в областях низкой плотности и в поле излучения с существенным ультрафиолетовым компонентом.

Все остальные Кассегреновские спектры PU Vul были получены с апреля по сентябрь 1990 года, когда система наблюдалась довольно регулярно во всех спектральных диапазонах.

В коротковолновой области – см.рис.7 и таблицу 8 – виден систематический рост эквивалентных ширин эмиссионных линий, обнаруженных на спектре в ноябре 1988 года (JD...7471). На спектрах JD...8036 и 8101, простирающихся несколько дальше в длинноволновую область, видна эмиссия H_γ и авроральная линия [OIII] λ 4363 Å.

В сине-зеленой области – см.рис.8 и таблицу 9 – в области $\lambda\lambda$ 5100-5440 Å, не охваченной спектром JD ...7773, зарегистрированы сильные линии MgI(2), линия HeII λ 5411 Å, заподозрены многочисленные разрешенные и запрещенные линии FeI и FeII, NIII, OI, CaI, CIII, CrI и CrII и некоторых других металлов.

В желтой области спектра, зарегистрированной в июле и сентябре 1990 года – см.рис.9 и таблицу 10 – доминируют запрещенные линии [OI] λ 5577 Å и λ 6300 Å, [NII] λ 5755 Å и

Таблица 6. ПЗС наблюдения на Кассегреновском спектрографе Шайновского рефлектора
диапазон длин волн 7700-9015 ÅÅ

| Дата | | | | 23.10 | 3.9 | 28.4 | 25.5 | 28.7 | 15.9 |
|------------------------------|---|-------------------------------|----------------------|--------------------------|------|------|------|------|------|
| | | | | 1988 | 1989 | 1990 | 1990 | 1990 | 1990 |
| JD 2440000 + | | | | 7458 | 7773 | 8010 | 8037 | 8101 | 8150 |
| лабораторная длина волны (Å) | элемент, состояние ионизации, номер мультиплета | | | эквивалентная ширина (Å) | | | | | |
| 7708.8 | FeI(1F) | 10.8 FeII(30F) | 11.7 FeII(73) | | | | | | |
| | 12.7 CoI(126) | | | 3.4 | | | | | |
| 7772.0, | 74.2, 75.4 OI(1) | 73.9 FeI(13F) | 80.5 BaI(5) | 3.4 | 1.0 | | | | |
| 7867.8 | CrI(9F) | 70.0 ZrI(41) | | 3.0 | 1.5 | | | | |
| 7874.2 | FeII(1F) | 76.3 FeI(13F) | 77.1 MgII(8) | | | | | | |
| | 78.2 CII(3) | 79.3 MnII(7F) | | 1.1 | 1.0 | | | | |
| 7889.2 | ZrII(19F) | | | <1 | <1 | | | | |
| 7893.6 | ZrII(3F) | 96.4 MgII(8) | | 2.0 | <1 | | | | |
| 7916.2 | TiII(6F) | 17.0 FeII(29F) | 17.0 TiII(25F) | 1.6 | 2.0 | | | | |
| 7966.4 | TiII(7F) | 67.4 SII(12) | | <1 | <1 | | | | |
| 7974.3 | CrII(11F) | 75.6, 77.0 TiII(6F) | | 1.4 | <1 | | | | |
| 7980.6 | CII(2) | 82.0, 82.4, 87.0, 87.3 OI(19) | | <1 | <1 | | | | |
| 8112.0 | NI(8F) | 15.3 AI(1) | | 2.9 | <1 | | | | |
| 8160.7 | TiI(18F) | 61.1 VI(30) | | <1 | <1 | 1.7 | | | |
| 8183.3 | NaI(4) | 83.7, 85.5 CrI(9F) | 84.8, 88.0 NI(2) | | | | | | |
| | 86.7 VI(30) | | | 5.0 | 5.0 | 2.5 | | | |
| 8212.0 | CII(2) | 12.6 ZrI(40) | 16.3 NI(2) | 3.6 | 3.6 | 1.9 | 1.7 | | |
| 8276.3 | 81.1, 86.4 HI(13) | | | 4.6 | 4.8 | 4.1 | 5.6 | 4.3 | 3.1 |
| 8296.9, | 03.2 CrI(57) | 98.8 HI(12) | 00.3 NeI(12) | <1 | <1 | <1 | <1 | <1 | <1 |
| 8303.2 | CrI(57) | 03.2 NiII(2F) | 05.6 AsI(5) | | | | | | |
| | 05.9 ZrI(40) | 06.1 HI(12) | 06.8 SiI(19) | | | | | | |
| | 07.7 ScII(3F) | 08.7 CrII(1F) | | <1 | <1 | <1 | <1 | <1 | 1.4 |
| 8314.3 | HI(12) | 14.7 SII(12) | 15.7 ZrII(25F) | <1 | <1 | <1 | <1 | <1 | 1.2 |
| 8321.5 | FeI(26F) | 23.4 HI(12) | 26.7 ScII(3F) | <1 | <1 | <1 | <1 | <1 | 1.9 |
| 8333.3 | CII(2) | 33.8 HI(11) | 35.2 CI(10) | <1 | <1 | <1 | <1 | <1 | 1.7 |
| 8342.3 | FeII(30F) | 43.0, 47.2 VII(17F) | 45.6 HI(11) | | | | | | |
| | 47.2 ScII(3F) | 47.6 FeI(1F) | 48.3 CrI(56) | | | | | | |
| | 48.9 TiII(30F) | | | 2.4 | 2.4 | 1.9 | 3.0 | 2.0 | 3.6 |
| 8357.8 | CrII(1F) | 59.0 HI(11) | 59.6 AlII(40) | | | | | | |
| | 60.6 CIII(5) | | | 5.6 | 4.2 | 5.1 | 5.1 | 3.3 | 6.6 |
| 8371.3 | TiII(30F) | 74.5 HI(11) | 76.4, 77.6 NeI(12) | 3.3 | 2.8 | 2.2 | 2.3 | 2.2 | 4.5 |
| 8389.4 | ZrI(40) | 92.4 HI(11) | 95.9 MnI(53) | 3.5 | 2.9 | 2.9 | 3.3 | 2.5 | 4.3 |
| 8409.9 | MnI(53) | 12.4 TiI(33) | 13.0 FeI(12F) | | | | | | |
| | 13.3 HI(10) | 13.3 FeII(38F) | 13.8 VII(17F) | | | | | | |
| | 14.0 ZrI(40) | | | 5.4 | 3.5 | 4.5 | 3.6 | 2.6 | 8.0 |
| 8418.4 | NeI(18) | 20.7 VII(2F) | 24.6 AI(3) | 3.2 | 4.1 | 4.6 | 1.3 | 1.0 | 2.7 |
| 8435.7 | TiI(33) | 36.4 TiII(15F) | 37.9 VIII(2F) | | | | | | |
| | 38.0 HI(10) | | | 6.4 | 3.2 | 6.4 | 3.3 | 1.8 | 4.2 |
| 8444.0, | 44.5 SiI(46) | 44.8 ZrII(10F) | 45.3, 46.4 CrII(25F) | | | | | | |
| | 46.1 FeII(29F) | 46.4, 46.8 OI(4) | | 78 | 76 | 120 | 84 | 63 | 60 |
| 8464.6 | ZrI(40) | 66.4 NiI(4F) | 67.0 FeI(24F) | | | | | | |
| | 67.3 HI(10) | 67.5 FeI(33F) | 68.4 FeI(60) | | | | | | |
| | 69.8 FeI(25F) | | | 7.1 | 7.9 | 16 | 12 | 9.6 | 8.0 |
| 8485.9, | 90.2 VII(17F) | 88.2 FeI(24F) | 88.9 TiI(2F) | 7.7 | 10 | 23 | 21 | 14 | 12 |
| 8498.0 | CaII(2) | 01.5 SiI(47) | 01.8 CIII(3F) | 02.4 SiI(46) | | | | | |
| | 02.5 HI(10) | | | 11 | <1 | 14 | 15 | 10 | 7.2 |
| 8520.2 | SII(34) | 20.2 CrII(19F) | 21.1 CsI(1) | | | | | | |
| | 21.4 AI(8) | 21.7 TiI(3F) | 25.4 ZrII(10F) | | | <1 | 1.4 | <1 | <1 |

Таблица 6 (окончание)

| Дата | 23.10 3.9 28.4 25.5 28.7 15.9 1988 1989 1990 1990 1990 1990 | | | | | |
|------------------------------|--|--------------------|----------------|--------------------------|----------------|----------------|
| JD 2440000 + | 7458 7773 8010 8037 8101 8150 | | | | | |
| лабораторная длина волны (Å) | элемент, состояние ионизации, номер мультиплета | | | эквивалентная ширина (Å) | | |
| 8541.6 | AsI(3) 42.1 | CaII(2) 43.7, 48.8 | CrI(56) 44.5 | VII(28F) 45.1 | VII(2F) 45.4 | HI(10) 46.2 |
| 8564.6 | FeI(1F) 64.7 | AsI(3) 65.9 | TiII(15F) 67.6 | ScII(2F) 67.7 | NI(8) 68.0 | 68.2 |
| 8594.0 | NI(8) 96.3 | FeI(33F) 98.3 | VIII(2F) 98.4 | HI(9) 98.8 | TiI(29F) 99.1 | VIII(1F) 99.2 |
| 8615.4 | VIII(2F) 17.0 | FeII(13F) 17.0 | 68.0 | 68.0 | 68.0 | 68.0 |
| 8626.8 | TiI(16F) 27.4 | VII(11F) 29.2 | NI(8) 27.4 | 27.4 | 27.4 | 27.4 |
| 8662.1 | CaII(2) 65.0 | HI(9) 65.7 | YII(6F) 67.9 | AI(6) 70.9, 72.1, 74.0 | MnI(49) 74.3 | VII(17F) 75.4 |
| 8669.3 | TiI(2F) 74.3 | VII(17F) 75.4 | TiI(68) 86.1 | NI(1) 83.4 | VIII(1F) 86.3 | CI(14) 88.6 |
| 8683.4, | 86.1 | NI(1) 83.4 | VIII(1F) 86.3 | CI(14) 88.6 | FeI(60) 89.7 | TiI(16F) 89.7 |
| 8701.0, | 03.8 | MnI(49) 02.7 | ZrII(9F) 03.0 | TiII(33F) 03.2 | NI(1) 03.8 | CrII(18F) 04.2 |
| | 03.2 | NI(1) 03.8 | CrII(18F) 04.2 | NiII(12F) 05.1 | TiI(16F) 06.8 | FeII(52F) 06.8 |
| | 05.1 | TiI(16F) 06.8 | FeII(52F) 10.8 | BaII(5) 11.7 | NI(1) 10.8 | 11.7 |
| 8709.4 | VII(2F) 10.8 | BaII(5) 11.7 | NI(1) 18.8 | NI(1) 19.6 | TiI(140) 19.7 | TiII(36F) 21.5 |
| 8715.8 | FeII(42F) 16.2 | TiI(2F) 18.8 | NI(1) 19.6 | TiI(140) 19.7 | TiII(36F) 21.5 | TiI(16F) 22.5 |
| | 19.7 | TiII(36F) 21.5 | TiI(16F) 22.5 | TiII(16F) 50.5 | HI(9) 50.5 | 50.5 |
| 8747.4 | NI(1) 50.5 | HI(9) 50.5 | 50.5 | 50.5 | 50.5 | 50.5 |
| 8804.6 | FeI(106) 06.7, 06.8 | MgI(7) 08.5 | TiI(17F) 26.0 | CrII(19F) 30.3 | CoII(1F) 26.0 | 26.0 |
| 8824.2 | FeI(60) 26.0 | CrII(19F) 30.3 | CoII(1F) 26.0 | 26.0 | 26.0 | 26.0 |
| 8862.5 | ZrII(26F) 62.8 | HI(9) 65.8 | NeI(8) 23.6 | AlII(14) 23.8 | MgI(25) 21 | 16 |
| 8921.0 | ZrIII(5F) 23.6 | AlII(14) 23.8 | MgI(25) 21 | 16 | 8.4 | 4.4 |
| 9012.0 | CrII(18F) 14.9 | HI(9) 15.2 | ZrI(39) 10 | 5.2 | | |

бленда D линий натрия и гелия. Другие две дюжины эмиссий обусловлены линиями гелия, азота, кислорода, кремния, скандия, ванадия и запрещенными линиями железа, титана, ванадия, хрома, марганца, циркония. Линии мультиплетов NaI(5), Al(10), Si(29) и LaII(4), заподозренные на первом Кассегреновском спектре в поглощении, попадают здесь на эмиссионные детали.

На спектрах в области H_{α} , полученных в 1990 году – см. рис.6 – обнаруживается систематическое возростание эквивалентных ширин эмиссионных линий, но сильная абсорбция около λ 6870 Å сохраняется до конца этих наблюдений.

На рис.5 и в таблице 6 представлен спектр PU Vul в ИК области, охватывающий более длинноволновый диапазон по сравнению с теми, что приведены на рис.4. Здесь хорошо видны линии ИК триплета CaII, ряд водородных линий Пашеновской серии, среди более слабых линий можно подозревать эмиссии NI, MgI, MnI, [TiI] и [TiII], [VI] и [VII], [FeI], [CrII], [ZrII]

4 Спектры PU Vul, полученные на ОЗСП БТА

Наблюдения PU Vul на ОЗСП БТА перекрывают в 5 раз менее широкий интервал длин волн по сравнению с наблюдениями на Кассегреновском спектрографе ЗТШ и примерно половину того интервала времени, когда велись описанные наблюдения на ЗТШ. Однако, наблюдения на ОЗСП БТА дали спектры со спектральным разрешением в несколько раз лучшим, что позволило получить качественно новые результаты.

Таблица 7. ПЗС наблюдения на Кассегреновском спектрографе Шайновского рефлексора
диапазон длин волн 6230-7070 ÅÅ

| Дата | | | | | | 5.11 | 26/28.4 | 24.5 | 28.7 | 15.9 |
|------------------------------|---|----------------------|-------------------|---------------|------|--------------------------|---------|------|------|------|
| | | | | | | 1988 | 1990 | 1990 | 1990 | 1990 |
| JD 2440000 + | | | | | | 7471 | 8008/10 | 8036 | 8101 | 8150 |
| лабораторная длина волны (Å) | элемент, состояние ионизации, номер мультиплета | | | | | эквивалентная ширина (Å) | | | | |
| 6244.5 | ScI(3) | 44.6 SiI(27) | 45.2 VI(20) | 45.6 ScII(28) | | | | | | |
| | 49.4 CrI(11F) | 49.8, 51.3 CrI(12F) | 49.9 LaI(7) | | 2.7 | 1.8 | 2.0 | 2.1 | 2.5 | |
| 6295.5 | VI(19) | 96.6 TiI(1) | 0.2 OI(1F) | 0.7 ScII(28) | 3.2 | 6.4 | 6.5 | 8.0 | 11.1 | |
| 6309.9 | ScII(28) | 10.2 SIII(3F) | 12.7 SII(26) | | | | | | | |
| | 14.6 ZrII(17F) | | | | 3.9 | 4.0 | 5.2 | 5.2 | 8.6 | |
| 6317.6 | ZrII(11F) | 20.4 LaII(19) | 20.9 ScII(28) | | | 5.4 | 3.6 | 3.4 | 6.4 | |
| 6344.6 | ZrII(12F) | 44.8 ScI(1) | 46.7 MgII(16) | | | | | | | |
| | 47.1 SiII(2) | 48.5 FI(3) | 49.7 MnI(39) | | 4.8 | 4.2 | 5.6 | 3.7 | 8.8 | |
| 6360.7 | TiII(18F) | 62.3 ZnI(6) | 62.9 CrI(6) | | | | | | | |
| | 63.9 OI(1F) | 65.5 NiII(8F) | | | 2.7 | 2.6 | 3.0 | 2.2 | 7.7 | |
| 6369.3 | SII(19) | 69.4 FeII(40) | 71.4 SiII(2) | | | | | | | |
| | 72.1 VII(13F) | | | | 3.1 | 3.1 | 3.2 | 2.7 | 7.9 | |
| 6381.1, | 2.0 VII(13F) | 82.2, 84.7 MnI(39) | | | | | | | | |
| | 83.0 NeI(3) | 84.9 SII(19) | 86.5 SII(5) | | 4.4 | 4.5 | 5.0 | 2.8 | 8.4 | |
| 6413.4 | ScI(1) | 13.7 FI(3) | 13.7 SII(19) | 13.9 MnI(39) | | | | | | |
| | 14.9 CrI(11F) | 15.5 SI(9) | 15.7 VII(13F) | | | | | | | |
| | 16.9 FeII(74) | 18.9 ZrII(17F) | | | 1.8 | 1.0 | 1.7 | <1 | <1 | |
| 6430.8 | TaI(11) | 30.9 FeI(62) | 31.1 VII(13F) | | | | | | | |
| | 32.7 FeII(40) | 34.0, 36.6 TiII(18F) | 35.0 YI(2) | | 1.9 | 1.1 | 1.5 | | <1 | |
| 6440.4 | FeII(15F) | 41.0, 43.5 MnI(39) | 41.7 NI(23) | | | | | | | |
| | 46.3 MnII(19) | 46.5 KV(2F) | | | 2.6 | 2.2 | 3.0 | 1.8 | <1 | |
| 6453.6, | 54.5, 56.0 OI(9) | 55.6 CaI(19) | 56.0 LaI(1) | | | | | | | |
| | 56.0 VII(13F) | 56.4 FeII(74) | 57.9 NI(22) | | 4.6 | 5.8 | 6.7 | 4.0 | 9.4 | |
| 6481.7, | 82.7, 83.8, 84.9 NI(21) | 82.1 NII(8) | | | | | | | | |
| | 84.7 CrI(11F) | 85.4 TaI(12) | | | 4.9 | 2.4 | 5.5 | <1 | 7.8 | |
| 6489.6 | NiI(5F) | 91.3 NI(21) | 91.7 MnI(39) | | | | | | | |
| | 93.8 CaI(18) | 96.9 BaII(2) | 97.8 VII(13F) | | 3.9 | 5.0 | 7.0 | 4.4 | 7.1 | |
| 6504.0 | SrI(8) | 04.9 NII(45) | 06.4 NI(21) | | | | | | | |
| | 06.4 ZrII(17F) | 06.5 NeI(3) | 07.6 FeII(32F) | | 4.0 | 4.8 | 5.7 | 2.7 | <1 | |
| 6516.1 | FeII(40) | 19.4 MnI(39) | | | 7.7 | <1 | <1 | <1 | <1 | |
| 6562.8 | H α | | | | >200 | >300 | >300 | >300 | >200 | |
| 6678.1 | HeI(6) | | | | 5.8 | 20 | 25 | 25 | 36 | |
| 6870.2 | FI(2) | 74.1 BaII(8) | | | 1.8a | 1.9a | 2.0a | 1.7a | 1.5a | |
| 6941.6 | NiI(2F) | 42.9 NII(53) | 44.9 FeII(43F) | | | | | | | |
| | 45.2 FeI(111) | 45.2 NI(29) | | | <1 | <1 | 1.3 | <1 | 1.2 | |
| 6966.3 | FeII(31F) | 66.4 FI(6) | 67.6 NII(53) | | 2.0 | | | | | |
| 7000.0, | 04.0 TiII(17F) | 01.9, 02.2 OI(21) | | | | | | | | |
| | 02.0 NiI(2F) | 03.0 NII(53) | 03.6,05.8 SiI(60) | | <1 | 2.6 | 2.5 | 2.3 | 2.3 | |
| 7025.5 | OI(32) | | | | | | 1.6 | | | |
| 7051.0, | 55.0 TiII(17F) | 51.7 CrIV(1F) | 54.4 NiII(8F) | | | | | | | |
| | 59.9 BaI(5) | | | | 1.7 | | | | | |
| 7065.2, | 65.7 HeI(10) | 66.1 ZrII(15F) | 66.2 LaII(1) | | | | | | | |
| | 67.2 AlI(1) | 68.4 LaI(1) | | | | 17 | | 32 | | |

Таблица 8. ПЭС наблюдения на Кассегреновском спектрографе Шайновского рефлектора

| | | диапазон длин волн 3690-4430 ÅÅ | | | |
|--------------------------------------|--|---------------------------------|------|------|------|
| Дата | | 5.11 | 24.5 | 28.7 | 15.9 |
| | | 1988 | 1990 | 1990 | 1990 |
| JD 24440000 + | | 7471 | 8036 | 8101 | 8150 |
| лаборатор- ная длина волны (Å) | элемент, состояние ионизации, номер мультиплета | эквивалентная ширина (Å) | | | |
| 3703.9 | H16 | <1 | <1 | | 1.1 |
| 3712.0 | H15 | 1.0 | 1.1 | | 1.1 |
| 3721.9 | H14 | <1 | 1.6 | | 2.3 |
| 3734.4 | H13 | 1.6 | 1.8 | <1 | 2.2 |
| 3750.1 | H12 | 1.0 | 3.0 | <1 | 4.3 |
| 3770.6 | H11 | 1.8 | 5.1 | 2.2 | 7.2 |
| 3797.9 | H10 | 1.8 | 6.1 | 3.6 | 9.6 |
| 3818.2, | 22.0 VI(9) 19.6, 19.8 HeI(22) | 1.0 | 2.0 | <1 | 3.0 |
| 3835.4 | H9 | 3.0 | 11 | 6.6 | 14 |
| 3867.5 | HeI(20) 68.7 NeIII(1F) | | 2.0 | <1 | 7.5 |
| 3889.1 | H8 | 4.8 | 24 | 16 | 30 |
| 3968.5 | CaII(1) 70.0 Hε | 5.4 | 26 | 26 | 28 |
| 3992.1, | 93.3, 93.6 CrII(4F) 93.6 NiII(4F) 93.4, 95.7 BaI(8) 95.0 NII(12) 96.3 CaV(2F) 96.3 FIV(1F) 96.6 ScI(7) 98.6 TiI(12) | <1 | 2.4 | 1.0 | 1.2 |
| 4023.7 | ScI(7) 24.6 TiI(12) 24.7, 25.0, 25.5 FII(2) 25.0, 26.2, 27.1 CrI(37) 25.6 HeII(3) 25.8 NiII(4F) 26.2, 26.4 HeI(18) | 2.0 | 4.6 | 4.2 | 6.2 |
| 4068.6 | SII(1F) 70.7 FeIII(4F) | 1.1 | 3.9 | 3.6 | 4.4 |
| 4076.2 | SII(1F) 77.7 SrII(1) | <1 | 1.0 | <1 | 1.3 |
| 4101.7 | Hδ | 11 | 38 | 29 | 50 |
| 4118.1 | CeII(11) 19.2, 20.3, 20.6 OII(20) 20.0, 23.0, 23.9 OV(4) 20.8, 21.0 HeI(16) 22.6 FeII(28) 23.9 FeV(2F) | 2.0 | 2.7 | 4.4 | 4.4 |
| 4141.3 | PrII(10) 42.5 FeV(2F) 43.1 PrII(4) 43.8 HeI(53) 43.8 LaII(54) 44.3 FeIII(4F) 45.0 FeI(7F) 46.6 FeII(21F) | <1 | 1.7 | 2.6 | 3.0 |
| 4170.0 | FeII(12) 72.7, 73.9, 74.9 FeI(19) 73.2 OsI(4) 73.4 FeII(27) 75.2 FeV(2F) 77.2 FeII(21F) 77.3 NdII(10) 77.5 YII(14) 78.4 VII(25) 78.9 FeII(28) 78.9 FeI(7F) 79.0 FeII(23F) 79.0 OV(4) 79.4 PrII(4) 79.4 FeI(8F) | 5.8 | 6.9 | 7.3 | 7.0 |
| 4197.8 | FeII(22F) 98.3 Al(4) 98.7 CeII(3,7) 99.8 HeII(3) 00.0 NIII(6) 00.9 VI(6) 01.6 FeI(8F) 02.0 FeI(42) 02.4 VII(25) 03.4 FeI(7F) | <1 | 2.5 | 3.3 | 3.2 |
| 4226.7 | CaI(2) 29.7 SmII(4) 30.4 FeI(8F) 31.6 FeII(21F) 32.4 NdII(8) 33.2 FeII(27) 33.2 CrII(31) 34.3 VII(24) 34.5 VI(6) 35.1, 35.3 MnI(23) | 4.8 | 8.6 | 7.5 | |
| 4242.4 | CrII(31) 42.5 MgII(20) 44.0, 44.8 FeII(21F) 44.4 WI(1) 44.5 FeII(12) 44.8 NiII(9) 46.2 FII(9) 46.8 ScII(7) 47.4 NdII(8) | 2.7 | 7.8 | 7.3 | |
| 4257.7 | MnI(23) 58.2 FeII(28) 59.3 VI(6) 60.9 OsI(1) | 1.0 | | | |
| 4274.9, | 75.2 MnII(6F) 75.6 CrII(31) 76.8 FeII(21F) 77.2 MoI(7) 78.2 FeI(7F) 79.0 MnII(6F) | 1.0 | 3.5 | 3.4 | |
| 4284.5 | NdII(10) 85.9 NiII(4F) 86.0 CII(42) 86.0, 87.4 TiI(44) 86.1 VII(23) 87.4 FeII(7F) 88.7 MoI(7) | 2.2 | 8.1 | 8.4 | |

Таблица 8 (окончание)

| Дата | | | | | 5.11 | 24.5 | 28.7 | 15.9 |
|------------------------------|---|---------------|--------------------------|----------------|--------------------------|------|------|------|
| | | | | | 1988 | 1990 | 1990 | 1990 |
| JD 24440000 + | | | | | 7471 | 8036 | 8101 | 8150 |
| лабораторная длина волны (Å) | элемент, состояние ионизации, номер мультиплета | | | | эквивалентная ширина (Å) | | | |
| 4300.0, | 01.9, 07.9 TiII(41) | 00.1 Al(4) | 00.4 LaII(9) | | | | | |
| | 00.6, 05.9 TiI(44) | 02.1 W(7) | 02.3 CrV(3F) | | | | | |
| | 02.5, 07.7 CaI(5) | 03.2 FeII(27) | 03.6 NdII(10) | | | | | |
| | 05.0 KII(5) | 05.4 SrII(3) | 05.9 FeII(21F) | 07.9 FeI(42) | 1.4 | 1.1 | 2.0 | |
| 4317.1, | 19.6 OII(2) | 17.3 ZrII(40) | 17.4, 18.9, 22.0 CII(28) | | | | | |
| | 18.7 CaI(5) | 18.8 CrII(37) | 19.6 FeII | 21.9 FeII(37F) | | 2.0 | 3.2 | |
| 4340.5 | H _γ | | | | | 56 | 57 | |
| 4356.1 | FeII(22F) | 58.1 FeII(6F) | 58.2 NdII(10) | 58.3 HgI(1) | | | | |
| | 58.4 FeII(21F) | 59.3 FeII(7F) | 61.7 SrI(6) | | | | | |
| | 62.1 NiII(9) | 63.2 OIII(2F) | | | | 9.8 | 10 | |
| 4382.8 | FeII(6F) | 83.5 FeI(41) | 83.8 AlI(16) | | | | | |
| | 84.6, 90.6 MgII(10) | 84.7 VI(5) | 85.4 FeII(27) | | | | | |
| | 87.9 HeI(51) | 89.1 VII(13) | | | | 5.1 | | |
| 4413.8 | FeII(7F) | 14.2 VII(13) | 14.3 PII(25) | 14.4, | | | | |
| | 16.3 FeII(6F) | 14.9 MnI(22) | 14.9 OII(5) | 15.1 FeI(41) | | | | |
| | 17.0 OII(5) | 17.3 PII(24) | 17.7 TiII(40) | 18.8 CeII(2) | | 12 | | |

Таблица 9. ПЗС наблюдения на Кассегреновском спектрографе Шайновского рефлектора

диапазон длин волн 4250-5380 Å

| Дата | | | | | 3.9 | 28.4 | 28.7 | 15.9 |
|------------------------------|---|----------------|-------------------|--------------|--------------------------|------|------|------|
| | | | | | 1989 | 1990 | 1990 | 1990 |
| JD 24440000 + | | | | | 7773 | 8010 | 8101 | 8150 |
| лабораторная длина волны (Å) | элемент, состояние ионизации, номер мультиплета | | | | эквивалентная ширина (Å) | | | |
| 4284.5 | NdII(10) | 85.9 NiII(4F) | 86.0 CII(42) | 86.0, 87.4 | | | | |
| | TiI(44) | 86.1 VII(23) | 87.4 FeII(7F) | 88.7 MoI(7) | 7.5 | 8.1 | | |
| 4300.0, | 01.9, 07.9 TiII(41) | 00.1 Al(4) | 00.4 LaII(9) | | | | | |
| | 00.6, 05.9 TiI(44) | 02.1 W(7) | 02.3 CrV(3F) | | | | | |
| | 02.5, 07.7 CaI(5) | 03.2 FeII(27) | 03.6 NdII(10) | | | | | |
| | 05.0 KII(5) | 05.4 SrII(3) | 05.9 FeII(21F) | 07.9 FeI(42) | 1.7 | 3.6 | | |
| 4340.5 | H _γ | | | | 52 | 60 | | |
| 4356.1 | FeII(22F) | 58.1 FeII(6F) | 58.2 NdII(10) | | | | | |
| | 58.3 HgI(1) | 58.4 FeII(21F) | 59.3 FeII(7F) | | | | | |
| | 61.7 SrI(6) | 62.1 NiII(9) | 63.2 OIII(2F) | | 10 | 13 | | |
| 4382.8 | FeII(6F) | 83.5 FeI(41) | 83.8 AlI(16) | | | | | |
| | 84.6, 90.6 MgII(10) | 84.7 VI(5) | 85.4 FeII(27) | | | | | |
| | 87.9 HeI(51) | 89.1 VII(13) | | | 5.4 | 1.4 | | |
| 4413.8 | FeII(7F) | 14.2 VII(13) | 14.3 PII(25) | | | | | |
| | 14.4, 16.3 FeII(6F) | 14.9 MnI(22) | 14.9, 17.0 OII(5) | | | | | |
| | 15.1 FeI(41) | 17.3 PII(24) | | | | | | |
| | 17.7 TiII(40) | 18.8 CeII(2) | | | 8.6 | 6.3 | | |

Таблица 9 (продолжение)

| Дата | | 3.9 | 28.4 | 28.7 | 15.9 |
|------------------------------|---|--------------------------|------|------|---------|
| | | 1989 | 1990 | 1990 | 1990 |
| JD 24440000 + | | 7773 | 8010 | 8101 | 8150 |
| лабораторная длина волны (Å) | элемент, состояние ионизации, номер мультиплета | эквивалентная ширина (Å) | | | |
| 4449.9 | PrII(4) 50.7 CeII(3) 51.6 VII(30) 51.6, 53.0 MnI(22) 52.0 NdII(6) 52.1 FeII(7F) 52.4 OII(5) 52.4 PII(31) 54.4 FeI(21F) 54.8, 55.9, 56.6 CaI(4) 55.0, 55.3, 55.8, 57.0, 57.5, 58.3, 60.4, 61.1 MnI(28) 57.5, 59.8, 60.3 VI(21) 57.9 FeII(6F) 58.6 FeI(6F) 60.2 CeII(2) | | 4.8 | 3.4 | |
| 4468.5 | TiII(31) 68.7 PrII(20) 70.1, 72.8 MnI(22) 70.3 FeII(6F) 70.4 VII(30) 70.9 TiII(40) 71.2 CeII(8) 71.5, 71.7 HeI(14) 72.4 TiI(19F) 72.9 FeII(37) 73.0 SmII(26) 73.5 FeI(6F) 74.8 AII(38) 74.9 FeII(7F) 75.3 PII(24) 75.3 CII(7) 75.7 YI(14) | | 6.1 | 8.0 | |
| 4486.4, | 88.8 TiI(19F) 87.3, 87.5 YI(14) 87.8 PrII(3) 88.2 NII(21) 88.8 FeII(6F) 89.2, 91.4 FeII(37) 90.0 CIII(41) 90.1 MnI(22) | | 3.3 | 1.8 | |
| 4505.3 | KII(4) 06.0 YI(14) 06.0 CuII(1) 06.6 NdII(7) 06.6, 07.4, 09.4 CaI(24) 06.9 SI(2F) 07.1 ZrI(31) 07.6 NII(21) 08.3 FeII(38) 08.5, 09.8, 15.5, 17.4, 21.8 TiI(19F) 09.6 FeII(6F) 10.2 PrII(20) 10.6 FeI(6F) 10.7 Al(9) 10.9, 14.9, 18.2, 23.6 NIII(3) 12.3 CaI(24) 12.7, 18.0 TiI(42) 13.6 YI(15) 14.8 NeII(55) 14.9 FeII(6F) 15.3 FeII(37) 16.0, 16.9 CIII(9) 16.6 FeI(6F) 17.8 NeII(55) 18.0, 22.8 TiI(42) 19.2 CIII(41) 19.6 SmII(49) 20.2 FeII(37) 22.4 LaII(8) 22.6 EuII(4) 22.6 FeII(38) 23.0 SmII(3) 23.1 CeII(2) | | 13 | 8.6 | <1 |
| 4546.4 | NIII(13) 47.3 NIII(3) 48.8, 52.5 TiI(42) 48.3 FeI(21F) 49.5 FeII(38) 49.5 LaI(11) 50.5, 52.0, 55.0 FeII(6F) 50.6, 54.5 FeI(6F) 53.0 ZrI(31) 53.2 NeII(55) 54.0 BaII(1) 54.8 PII(28) 55.0, 58.7, 58.8 CrII(44) 55.4 CsI(2) 55.5 TiI(42) 55.9 FeII(37) 55.9 CuII(1) 56.1 NdII(6) 56.7 NdII(12) 58.0 PII(29) | | 13 | 7.6 | 1.3 |
| 4580.8, | 80.9, 81.2 CrII(3F) 81.3 YI(15) 81.4, 85.9 CaI(23) 81.8 PII(9) 82.1 FeII(19) 82.8 FeII(37) 83.8 FeII(38) 86.4 VI(4) | | 12 | 6.6 | 15 2.0 |
| 4626.5 | MoI(6) 27.2 EuI(1) 27.3 Cl(2F) 28.2 CeII(1) 28.4 Al(9) 28.7 PII(28) 28.8 PrII(1) 28.9 CoI(15) 29.3 FeII(37) 29.8 ZnI(8) 30.0 FeI(21F) 30.5, 43.1 NII(5) 31.9, 40.0 FeI(5F) 32.3 FeII(5F) 38.1 SiIII(13) 38.9 OII(1) 39.2 MnII(18) 39.7 FeII(4F) 34.2, 40.6, 41.9 NIII(2) 42.2 SmII(36) 43.7 YI(4) | | 24 | 23 | 12 12 |
| 4655.4 | OI(18) 55.8 TiII(38) 56.5 TiI(6) 57.0 FeII(43) 58.1 FeIII(3F) 59.4 KII(5) | | 7.9 | 7.5 | 7.0 4.2 |
| 4683.8 | SiIII(13) 85.7 HeII(1) 86.0 FeI(21F) 87.2 SmII(3) 87.6 FeII(5F) 87.8 ZrI(43) | | 6.0 | 5.0 | 5.7 5.8 |

Таблица 9 (продолжение)

| Дата | элемент, состояние ионизации, номер мультиплета | | | | 3.9 | 28.4 | 28.7 | 15.9 |
|------------------------------|--|--------------------|-----------------------|----------------|--------------------------|------|------|------|
| JD 24440000 + | | | | | 1989 | 1990 | 1990 | 1990 |
| лабораторная длина волны (Å) | | | | | 7773 | 8010 | 8101 | 8150 |
| | | | | | эквивалентная ширина (Å) | | | |
| 4701.5 | FeIII(3F) | 01.6 AlIII(6) | 02.3 Al(9) | 03.0 MgI(11) | | | | |
| | 04.4 NeI(11) | 04.4 SmII(1) | 05.4 OII(25) | | 1.4 | 1.5 | 2.3 | 1.5 |
| 4710.0 | OII(24) | 10.1 NeI(11) | 10.1 ZrI(43) | | | | | |
| | 11.9, 15.2 FeI(21F) | 12.1, 15.3 NeI(16) | 12.9 LaII(38) | | | | | |
| | 13.1, 13.4 HeI(12) | 15.3 TiII(6) | 15.3 NeI(16) | | 2.8 | 1.7 | 2.1 | 1.1 |
| 4727.9 | CoI(15) | 28.4 LaII(22) | 28.1 FeII(4F) | | | | | |
| | 31.4 FeII(43) | 32.1 CoI(15) | 32.1 AlI(38) | | | | | |
| | 33.0 TiII(29) | 33.9 FeIII(3F) | 35.9 AlI(6) | | 4.5 | 2.0 | 1.7 | 1.2 |
| 4752.7 | OII(24) | 52.7 NeI(21) | 53.2 ScI(5) | | | | | |
| | 54.7 FeIII(3F) | 57.6 WI(7) | | | <1 | 1.5 | <1 | |
| 4811.9 | SrI(5) | 12.8, 17.3 Cl(5) | 12.9 CuII(8) | 13.1 NiI(3F) | | | | |
| | 13.9 FeIII(3F) | 14.8 GeII(2) | 15.0 ZrI(44) | | | | | |
| | 15.6 ZrI(43) | 15.8 SmII(14) | 16.0 SmII(41) | | | | | |
| | 17.3 Cl(5) | | | | 5.4 | 2.5 | 3.0 | 1.8 |
| 4861.3 | H _β | | | | 220 | 140 | 140 | 100 |
| 4886.8 | VI(50) | 87.3 CrII(15F) | 87.7 ZrI(43) | | | | | |
| | 89.5 MnII(5F) | 89.6 FeII(4F) | 89.7 FeII(3F) | | | | | |
| | 89.7 CuII(1) | 90.9 OII(28) | 92.0 SrI(10) | | 7.3 | 4.7 | 4.0 | 4.1 |
| 4904.3 | VI(50) | 04.8 AlI(34) | 05.1 ZrI(43) | 05.4 FeII(20F) | | | | |
| | 06.9 OII(28) | 07.1 CoI(14) | 07.2 CIII(39) | | 3.0 | 11 | 3.6 | 2.1 |
| 4921.0, | 21.8 LaII(7) | 21.9 HeI(48) | 23.0 VII(7F) | | | | | |
| | 23.9 FeII(42) | 24.0 ZnII(3) | 24.1, 25.3 SII(7) | | | | | |
| | 24.5 FeIII(2F) | 24.6 OII(28) | 24.8 CrII(15F) | | | | | |
| | 24.8 CIII(39) | 25.7 VI(50) | 25.8 TiII(23F) | | | | | |
| | 26.1 TiI(39) | | | | 18 | 12 | 12 | 13 |
| 4946.8 | TiI(12F) | 47.2 CrII(15F) | 47.4, 50.7 FeII (20F) | | | | | |
| | 48.0 TiI(39) | 48.6 SmII(49) | 49.8 LaI(4) | | 2.7 | <1 | | |
| 4957.0 | NeI(25) | 57.2 BaII(10) | 58.2 FeII(4F) | | | | | |
| | 58.9 OIII(1F) | 59.1 NdII(1) | 59.7 CoI(14) | | | | | |
| | 61.2 FeI(4F) | 61.9 SmII(41) | | | | | <1 | 2.1 |
| 4972.2 | AlI(6) | 73.4 FeII(20F) | 76.3 VII(7F) | | 1.2 | <1 | <1 | 1.1 |
| 5005.1 | NII(19) | 05.2 NeI(29) | 05.5, 20.2 FeII(20F) | | | | | |
| | 06.2 WI(1) | 06.6 TiII(19F) | 06.6 FeII(4F) | | | | | |
| | 06.8 OIII(1F) | 06.8 CuII(10) | 07.3 CoI(14) | | | | | |
| | 09.4 AlI(6) | 13.0 BaII(10) | 15.7 HeI(4) | | | | | |
| | 16.4 NII(19) | 18.4 FeII(42) | 19.3, 20.1 OI(13) | | 26 | 23 | 26 | 24 |
| 5039.0, | 41.7 Cl(4) | 39.1 FeII(19F) | 40.0 TiI(5) | | | | | |
| | 41.0 SiII(5) | 41.8 FeI(36) | 43.3 TiI(12F) | | | | | |
| | 44.8, 47.2 CII(35) | 45.1 NII(4) | 47.7 HeI(47) | | | | | |
| | 47.9 TiII(19F) | 49.3 FeII(20F) | 49.7 CrII(2F) | | 4.0 | 4.3 | 4.5 | 3.1 |
| 5053.3 | WI(1) | 56.0 SIII(5) | 56.3 KII(3) | | 3.1 | 4.2 | 3.6 | 1.9 |
| 5108.6 | CrII(14F) | 10.4 FeI(1) | 10.8 PrII(35) | 11.6 FeII(19F) | | | | |
| | 12.5 CrI(19) | 14.1 FeIII(5) | 14.6 LaII(36) | | 2.6 | 1.9 | 2.0 | 1.4 |
| 5156.0 | FeIII(5) | 56.0 SrI(11) | 57.6 CrII(14F) | | | | | |
| | 58.0 FeII(18F) | 58.8 FeII(19F) | | | | 8.7 | 9.8 | 6.9 |

Таблица 9 (окончание)

| Дата | | | | 3.9 | 28.4 | 28.7 | 15.9 |
|------------------------------|---|--------------------------|---------------------|--------------------------|------|------|------|
| | | | | 1989 | 1990 | 1990 | 1990 |
| JD 24440000 + | | | | 7773 | 8010 | 8101 | 8150 |
| лабораторная длина волны (Å) | элемент, состояние ионизации, номер мультиплета | | | эквивалентная ширина (Å) | | | |
| 5166.3, | 68.9 FeI(1) | 67.3 MgI(2) | 67.5 FeI(37) | | | | |
| | 68.6 CrI(19) | 69.0 FeII(42) | 70.8 FeI(3F) | | | | |
| | 71.6 FeI(36) | 72.7 MgI(2) | | 6.3 | 6.2 | 2.2 | |
| 5180.8 | FeI(20F) | 81.2 CrI(15F) | 82.0 ZnI(7) | | | | |
| | 82.0 FeII(18F) | 83.4 CrI(19) | 83.4 LaII(36) | | | | |
| | 83.6 MgI(2) | 84.8 FeII(19F) | | <1 | 1.5 | <1 | |
| 5194.2 | FeI(20F) | 94.4 FeIII(5) | 94.9 FeI(36) | | | | |
| | 97.3 CrI(15F) | 97.6 FeII(49) | 98.5, 00.7 NiI(1F) | | | | |
| | 99.2 FeII(35F) | | | 2.9 | 4.6 | 1.0 | |
| 5217.9, | 21.3 CrII(3) | 19.0 CrII(13F) | 20.1 FeII(19F) | | | | |
| | 20.1 PrII(35) | 20.6 FeI(3F) | | <1 | 1.7 | <1 | |
| 5232.5, | 37.3 CrII(43) | 34.3 LaI(10) | 34.6 FeII(49) | | | | |
| | 35.1 VII(6F) | | | 3.0 | 3.9 | 1.9 | |
| 5259.4 | LaII(21) | 59.6 CrII(30) | 59.7 PrII(35) | | | | |
| | 60.4, 61.7, 62.2, 64.2, 65.6 CaI(22) | 60.9 NiII(15) | | | | | |
| | 61.6 FeII(19F) | 64.1 MgII(17) | 64.2 CrI(18) | | | | |
| | 64.8 FeII(48) | | | | 4.5 | 3.0 | |
| 5268.8 | FeI(19F) | 69.5 FeI(15) | 70.3 CaI(22) | | | | |
| | 70.4 FeI(37) | 70.4 FeIII(1F) | 70.6, 72.6 NiII(15) | | | | |
| | 71.2 LaI(4) | 73.4 FeII(18F) | 74.3 NiII(9F) | | | | |
| | 75.0 CrII(43) | 75.1 OI(27) | 75.8 NiII(14F) | | | | |
| | 76.0 FeII(49) | 77.4 ZrI(27) | 78.1, 79.0 SiI(4) | | | | |
| | 78.4 FeII(35F) | | | | 17 | 11 | |
| 5294.2, | 95.3, 97.0, 99.3 MnII(11) | 95.7 FeII(17F) | | | | | |
| | 96.1 PII(7) | 96.7, 98.3, 00.7 CrI(18) | | | | | |
| | 96.8 FeII(19F) | 97.9, 98.9 NiII(15) | 98.3 CrI(18) | | | | |
| | 99.0 OI(26) | 99.4 CrII(13F) | | | 1.2 | <1 | |
| 5313.6 | CrII(43) | 13.9 CrII(13F) | 14.4 NiII(15) | 16.1 PII(6) | | | |
| | 16.6 FeII(49) | 16.8 FeII(48) | 17.0 ZrII(1F) | | 15 | 6.9 | |
| 5330.7 | OI(12) | 31.5 ZrII(7F) | 32.4 PI(2F) | 32.9 FeI(36) | | | |
| | 33.6 FeII(19F) | 34.3 TiI(10F) | 34.9 CrII(43) | | 3.7 | | |
| 5362.1 | FeII(17F) | 62.6 ZrI(27) | 62.9 FeII(48) | 63.9 FeI(20F) | | | |
| 5376.5 | FeII(19F) | | | | 2.5 | | |
| | | | | | 3.4 | | |

На рис.10 показаны приведенные к континууму регистрограммы спектра PU Vul за 25.7.89 (JD...7733), суммарного спектра за 14 и 16.10.89 (JD...7814/6) и спектра за 8.10.90 (JD...8173). На всех этих спектрах видны многочисленные эмиссионные линии, но тщательный поиск абсорбционных линий не дал положительных результатов.

По наиболее слабым линиям спектра сравнения полная ширина инструментального профиля на уровне половины максимума (FWHM) спектрограмм ОЗСП БТА была оценена величиной 0.4 Å; ширины большинства эмиссионных линий в спектре PU Vul примерно втрое превосходили эту величину. Но все водородные линии имели сложные профили: на широкие эмиссионные контуры накладывались узкие абсорбционные компоненты; эти двугорбые профили представлены на рис.11. Очевидно, что существенно более низкое разрешение Кассегреновских спектрограмм не позволило обнаружить эту структуру.

Для каждого водородного профиля по далекому “синему” крылу коротковолнового эмиссионного

Таблица 10. ПЗС наблюдения на Кассегреновском спектрографе Шайновского рефлектора
диапазон длин волн 5400-6350 ÅÅ

| Дата | диапазон длин волн 5400-6350 ÅÅ | | | | 28.7 15/16.9 |
|------------------------------|---|--------------------------|-------------------------|----------------|--------------------------|
| JD 24440000 + | | | | | 1990 1990 |
| лабораторная длина волны (Å) | элемент, степень ионизации, номер мультиплета | | | | эквивалентная ширина (Å) |
| 5411.5 | HeII(2) | 12.0 FeIII(1F) | 12.6 FeII(17F) | 13.0 FeI(20F) | |
| | 13.3 FeII(16F) | 14.1 FeII(48) | 15.0 MnII(9F) | | 2.3 |
| 5423.2, | 23.5, 24.4 CIII(2) | 24.6 BaI(9) | 25.3 FeII(49) | | |
| | 25.9 PII(6) | 26.3 TiI(3) | 28.6 SII(6) | | <1 |
| 5431.4 | NiII(9F) | 32.1, 35.6 CrIII(2F) | 32.8 SII(6) | | |
| | 33.2 FeII(18F) | 34.3 ZrII(6F) | 34.6 FeI(15) | | |
| | 35.2, 35.8, 36.8 OI(11) | 35.3 TaI(9) | | | 1.2 |
| 5476.9 | NiI(59) | 77.2 FeII(34F) | 77.4, 81.2 FeI(20F) | | |
| | 77.7 FeII(49) | 78.1, 80.1 NII(29) | 78.4 CrII(50) | | |
| | 78.8, 82.9 VII(5F) | 80.3 BaII(9) | 80.9 SrI(9) | | |
| | 82.0 ScI(16) | 82.3 LaII(4) | | | <1 |
| 5495.4 | ZrII(7F) | 95.7 NII(29) | 95.8 FeII(17F) | 95.9 Al(14) | |
| | 96.0 VI(2) | 96.8 VII(5F) | 97.4 YII(27) | | |
| | 97.5 FeI(15) | 99.7 PII(6) | | | <1 |
| 5514.2 | ScI(15) | 14.7 WI(1) | 15.1 VI(2) | 15.4 VI(1) | |
| | 16.1 SmI(2) | 18.0 TiI(9F) | 19.0 BaI(9) | | <1 |
| 5526.8 | ScII(31) | 27.3 FeII(17F) | 27.5 YI(12) | 27.6 FeII(34F) | |
| | 27.7 VI(1) | 27.9 VII(5F) | 28.4 MgI(9) | | |
| | 28.9 ZrII(6F) | 30.1, 30.7 MnII(9F) | 30.8 CoI(38) | | 1.2 2.3 |
| 5533.0 | MoI(4) | 34.8, 40.1 SrI(9) | 34.9 FeII(55) | 35.1 TiI(7F) | |
| | 35.4 VI(1) | 35.5 BaI(2) | 36.0 CII(10) | | |
| | 37.0 MnII(9F) | 40.1 SrI(9) | | | 1.5 2.4 |
| 5577.4 | OI(3F) | 79.1 CrII(12F) | 79.6 VII(14F) | 79.7 MnII(9F) | |
| | 80.8 FeII(39F) | 81.9 YI(12) | 82.0 FeII(2F) | | 1.8 2.4 |
| 5675.7 | ZrII(6F) | 76.0, 79.6, 86.2 NII(3) | 82.6 NaI(6) | | |
| | 83.6 FeII(33F) | 84.5 SiI(11) | | | 3.2 3.7 |
| 5753.8 | FeII(33F) | 54.8 NII(3F) | 55.4, 55.6 TiI(6F) | | 74 74 |
| 5834.6 | FeI(2F) | 36.2 CrI(14F) | 37.3 AuI(2) | | <1 <1 |
| 5872.8 | FeI(2F) | 75.6, 75.7, 76.0 HeI(11) | | | |
| | 76.2, 76.9 CrI(14F) | 79.3 EuII(2F) | | | 52 68 |
| 5955.4 | ZrI(3) | 55.6 FeI(18F) | 57.6 SiII(4) | 58.5 OI(23) | 2.6 2.1 |
| 5979.0 | SiII(4) | 81.2 BaII(13) | | | 1.7 1.3 |
| 6043.1 | PII(5) | 43.4 CeII(30) | 44.9 ZrII(12F) | 45.4 TaI(10) | |
| | 45.8 CrI(12F) | 46.0 SI(10) | 46.3, 46.5 OI(22) | | |
| | 47.5 TiII(9F) | | | | 2.3 2.1 |
| 6142.5 | SII(30) | 43.2 ZrI(2) | 45.1 SiI(29) | 46.5 LaII(4) | |
| | 47.1 TiII(22F) | | | | <1 <1 |
| 6154.2, | 60.7 NaI(5) | 55.2, 55.7 SiI(29) | 56.0, 56.8, 58.2 OI(10) | | <1 <1 |
| 6167.8, | 70.2 NII(36) | 67.8, 69.4 CrI(12F) | 69.1, 69.6 CaI(20) | | |
| | 70.3 VI(20) | 70.6 HeII(8) | 72.7 LaII(4) | | |
| | 72.9 TiII(28F) | 73.0 EuII(9) | | | <1 <1 |
| 6184.5 | CrI(11F) | | | | <1 <1 |
| 6227.2 | TiII(22F) | 30.7 VI(19) | 31.3 FeI(29F) | 31.8 ScI(3) | |
| | 31.8 AlII(10) | 33.2 VI(20) | | | <1 <1 |
| 6233.2 | VI(20) | 33.8 HeII(7) | 37.6 SiI(27) | | <1 <1 |
| 6244.5 | ScI(3) | 44.6 SiI(27) | 45.2 VI(20) | 45.6 ScII(28) | |
| | 49.4 CrI(11F) | 49.8, 51.3 CrI(12F) | 49.9 LaI(7) | | 2.4 2.0 |

Таблица 10 (окончание)

| Дата | | 28.7 | 15/16.9 |
|------------------------------|--|--------------------------|---------|
| JD 24440000 + | | 1990 | 1990 |
| лабораторная длина волны (Å) | элемент, степень ионизации, номер мультиплета | эквивалентная ширина (Å) | |
| 6296.5 | VI(19) 96.6 TiI(1) 00.2 OI(1F) 00.7 ScII(28) | 7.6 | |
| 6309.9 | ScII(28) 10.2 SiII(3F) 10.8 HeII(7) 12.7 SiI(26) 14.6 ZrII(17F) | 4.8 | |
| 6317.6 | ZrII(11F) 20.4 LaII(19) 20.9 ScII(28) | 3.1 | |
| 6344.6 | ZrII(12F) 44.8 ScI(1) 46.7 MgII(16) 47.1 SiII(2) 48.5 FeI(3) 49.7 MnI(39) | 3.6 | |

компонента и практически полному “красному” крылу длинноволнового эмиссионного компонента был достроен полный фойгтовский профиль, и координаты центров тяжести этих профилей были использованы для построения калибровочных кривых по длинам волн. В качестве таких кривых использовались полиномы третьей степени, невязки полиномов и опорных точек не превышали 0.1 Å. Таким образом, как и в случае Кассегреновских спектров ЗТШ, на спектрах ОЗСП БТА определялись лабораторные длины волн спектральных линий.

С учетом указанной ширины инструментального профиля, точности проведения калибровочных кривых и вероятных скоростей дифференциальных движений в оболочке PU Vul в многие десятки км/с – см. ниже – отождествление узких линий проводилось в окрестностях измеренных длин волн в интервалах ± 1 Å. В Таблице 11 дан список вероятных отождествлений 78 эмиссионных линий. В ходе этого отождествления, как и при анализе Кассегреновских спектрограмм, мы ограничились только рассмотрением мультиплетов не слишком больших номеров и отсеивали попадавшие в рассматриваемые диапазоны длин волн компоненты низкой интенсивности при отсутствии в спектре более интенсивных компонентов соответствующих мультиплетов. Далее, не принимались во внимание стандартные относительные содержания различных элементов, поскольку, как уже отмечалось, в эпоху выхода PU Vul из глубокого минимума 1980-81 годов в спектрах системы были обнаружены существенные аномальные интенсивности ряда редких элементов (Белякина и др., 1985). В результате такой процедуры в качестве вероятных отождествлений были отобраны около 330 кандидатов, то есть в среднем около 4 кандидатов на каждую эмиссию. Для каждой из трех указанных дат в Таблице 11 приведены эквивалентные ширины W_λ и полные ширины линий на уровне половины максимальной интенсивности (FWHM) линий.

Сравнение кандидатов на отождествление в Таблицах 11 и 8 и 9, полученных в близкие эпохи наблюдений в перекрывающихся интервалах длин волн от 3868 до 5006 Å, обнаруживает определенные различия, обусловленные различиями в спектральных разрешениях спектрограмм. При отождествлении эмиссий Кассегреновских спектрограмм около каждой из них рассматривались более широкие диапазоны длин волн, что увеличивало число возможных кандидатов на отождествление, а лучшее разрешение спектров ОЗСП БТА позволило выделять более слабые эмиссии, неразличимые на Кассегреновских спектрах. Так, среди кандидатов на отождествление в Таблице 11 есть линии InI(1), ReI(1), SiIV(4), NiV(6) и NV(1), которых нет в Таблицах 8 и 9. Однако, в большинстве случаев эти кандидаты совпадают. Как и по Кассегреновским спектрограммам, можно говорить о преобладании разрешенных и запрещенных линий FeII, о большом числе линий HeI, OI и OII, FeI, TiI и TiII, CaI, MnI, CrII, LaII, NdII, линий высокоионизованных ионов HeII, NeIII, FeIII, CrIV. Но несмотря на многочисленность кандидатов на отождествление, есть эмиссии, где все кандидаты – это нейтральные атомы или ионы первой стадии ионизации. Поэтому, несмотря на неопределенность отождествления, связанную с большим числом кандидатов, реальность широкого диапазона температур возбуждения и ионизации различных атомов и ионов не вызывает сомнений: как и в Кассегреновских спектрах, одновременное существование в спектре линий ионизованного

Таблица 11. Эмиссионные линии в спектрах PU Vul, полученных на ОЗСП БТА

| Дата JD 24440000 + | элемент, состояние ионизации, номер мультиплета | | | 25.07.89 7733 | 14-16.10.89 7814/6 | 08.10.90 8173 | |
|--------------------------------|--|---------------------|-----------------|----------------------------|-----------------------|------------------|---------|
| лабораторные длины волн (Å) | | | | W _λ (Å)/FWHM(Å) | | | |
| 3867.5 | HeI(20) | 68.0 WI(7) | 68.7 NeIII(1F) | | | 0.38/1.1 | |
| 3888.6 | HeI(2) | 89.1 H ₈ | 89.6 FeI(9F) | 1.9/1.8 | 3.5/1.8 | 1.9/1.5 | широкая |
| 3932.7 | FeII(8F) | 33.7 CaI(1) | | | 0.12/ | | |
| 3967.4 | OII(22) | 68.3 FeII(8F) | 68.3 GdII(3) | | | | |
| | 68.4 HeII(3) | 68.4 AII(2) | 68.5 CaII(1) | 0.35/ | 0.49/ | 0.53/ | |
| 3970.1 | H _ε | | | 4.4/3.5 | 4.75/3.4 | 5.0/1.8 | широкая |
| 4024.7, | 25.0, 25.5 FII(2) | 25.0, 26.2 CrI(37) | | | | | |
| | 25.6 HeII(3) | 25.8 NiII(4F) | 26.2 HeI(18) | 0.67/10.4 | 1.20/9.4 | 1.95/ | широкая |
| 4067.1 | NiII(11) | 67.4 LaII(26) | 67.9 CIII(16) | 0.95/1.0 | 1.27/0.9 | 1.02/1.1 | |
| 4100.0 | HeII(3) | 00.7 FeI(18) | 00.7 PrII(4) | | | | |
| | 01.7 H _δ | 01.8 InI(1) | 01.8 CeII(5) | 11.0/2.6 | 8.75/1.7 | 10.5/1.8 | широкая |
| 4119.2, | 20.3, 20.6 OII(20) | 20.8 HeI(16) | | 0.18/5.2 | 0.27/5.2 | 0.35/ | широкая |
| 4143.1 | PrII(4) | 43.8 HeI(53) | 43.8 LaII(54) | 0.14/6.5 | 0.36/6.5 | 0.62/ | широкая |
| 4172.0 | GaI(1) | 72.7 FeI(19) | 73.2 OsI(4) | | | | |
| | 73.4 FeII(27) | | | 0.55/0.9 | 0.82/1.1 | 0.32/1.1 | |
| 4177.3 | NdII(10) | 77.6 FeI(18) | 77.7 FeII(21) | | | | |
| | 78.4 VII(25) | 78.9 FeI(7F) | 79.0 OV(4) | 2.17/1.2 | 2.88/0.9 | 1.74/1.1 | |
| 4199.8 | HeII(3) | 00.0 NiII(6) | 00.6 TiIII(10F) | | | | |
| 4233.2 | FeII(27) | 33.2 CrII(31) | | 3.04/1.0 | 4.18/1.1 | 2.55/1.2 | |
| 4242.5 | MgII(20) | 43.6 BiII(1) | 44.4 WI(1) | 2.19/1.1 | 2.95/1.1 | 2.57/1.3 | |
| 4275.6 | CrII(31) | 76.8 FeII(21F) | 77.2 MoI(7) | 1.31/1.0 | 1.71/1.0 | 1.67/1.2 | |
| 4285.9 | NiII(4F) | 86.0 CII(42) | | | | | |
| | 86.0, 87.4 TiI(44) | 86.1 VII(23) | | 2.98/0.9 | 3.65/1.0 | 3.44/1.3 | |
| 4295.4 | CrII(37) | 95.7 TiI(44) | 96.1 CII(42) | 0.41/0.7 | 0.60/0.8 | 0.32/0.9 | |
| 4301.9 | TiII(41) | 02.1 WI(7) | 02.3 CrV(3F) | | | | |
| | 02.5 CaI(5) | 03.2 FeII(27) | | 0.61/1.2 | 0.77/1.0 | 0.36/0.9 | |
| 4305.0 | KII(5) | 05.4 SrII(3) | 05.9 FeII(21F) | 0.35/1.1 | 0.41/1.0 | 0.40/1.2 | |
| 4312.9 | TiII(41) | 13.5 CII(28) | 13.8 GdI(4) | | | | |
| | 14.1 ScII(15) | 14.2 SiIV(4) | | 0.39/1.5 | 0.43/1.0 | 0.23/1.0 | |
| 4318.7 | CaI(5) | 18.8 CrII(37) | 18.9 CII(28) | | | | |
| | 19.6 OII(2) | 19.6 FeII(21F) | | 0.96/1.0 | 1.33/1.0 | 1.27/1.2 | |
| 4325.0 | ScII(15) | 25.7 FeI(2) | 25.7 CIII(7) | | | | |
| | 25.7 LiII(5) | 25.7 BaII(17) | 25.8 OII(2) | | | | |
| | 25.9 CII(28) | | | 0.37/1.1 | 0.54/1.3 | 0.50/1.4 | |
| 4340.5 | H _γ | | | 22.0/1.4 | 20.0/1.5 | 26.0/1.4 | широкая |
| 4344.5 | CrI(22) | 45.2 Al(9) | 45.6 OII(2) | 0.58/0.8 | 0.65/0.8 | 1.24/1.0 | |
| 4351.1, | 51.8 CrI(22) | 51.3 OII(16) | 51.3 NdII(10) | | | | |
| | 51.8 FeII(27) | 51.9 MgI(14) | 52.1 Cl(15) | | | | |
| | 52.2 AII(1) | | | 2.17/1.4 | 2.80/1.5 | 2.05/1.7 | |
| 4358.2 | NdII(10) | 58.3 HgI(1) | 58.4 FeII(21F) | 3.25/1.1 | 4.21/1.3 | 4.05/1.6 | |
| 4361.7 | SrI(6) | 62.1 NiII(9) | 63.2 OIII(2F) | | | 3.71/2.6 | |
| 4366.9 | OII(2) | 68.2 CrII(37) | 68.3 OI(5) | 0.76/2.3 | 0.93/1.8 | 0.71/2.0 | |
| 4371.1 | FeIII(4) | 71.3 CrI(22) | 71.3 Cl(14) | | | | |
| | 71.4 AII(1) | 72.2 FeII(33) | 72.4 FeII(21F) | 0.48/1.0 | 0.63/1.1 | 0.70/1.3 | |
| 4386.6 | FeII(26) | 87.9 HeI(51) | | 1.44/1.9 | 1.85/1.8 | 1.72/1.8 | |
| 4412.2 | CrI(22) | 12.3 NdII(9) | 13.8 FeII(7F) | 1.70/1.1 | 2.31/1.1 | 1.95/1.2 | |
| 4414.9 | OII(5) | 14.9 MnI(22) | 16.3 FeII(6F) | 1.79/1.2 | 2.34/1.2 | 2.15/1.4 | |
| 4431.0 | AII(1) | 31.0 SiII(32) | 31.0 FeIII(4) | 0.10/1.0 | 0.21/0.8 | 0.12/1.0 | |
| 4450.7 | CeII(3) | 51.6 MnI(22) | 51.6 VII(30) | | | | |
| | 52.0 NdII(6) | | | 1.13/1.1 | 1.61/1.0 | 1.41/1.2 | |
| 4456.8 | CrII(16) | | | 0.68/1.0 | 0.82/1.0 | 0.91/1.2 | |

Таблица 11 (продолжение)

| Дата | | | | 25.07.89 | 14-16.10.89 | 08.10.90 | |
|--------------------------------|--|---------------|--------------------|----------------------------|-------------|----------|---------|
| JD 24440000 + | | | | 7733 | 7814/6 | 8173 | |
| лабораторные длины волн (Å) | элемент, состояние ионизации, номер мультиплета | | | W _λ (Å)/FWHM(Å) | | | |
| 4469.9 | HeI(15) | 70.1 MnI(22) | 70.3 FeII(6F) | | | | |
| | 70.4 VII(30) | 71.2 CeII(8) | 71.6 HeI(14) | 2.50/7.4 | 3.67/6.7 | 9.5/ | широкая |
| 4472.8 | MnI(22) | 72.9 FeII(37) | 73.5 FeI(6F) | | | | |
| | 74.8 AII(38) | | | 1.01/1.7 | 1.30/1.5 | 1.10/1.5 | |
| 4487.3, | 87.5 YI(14) | 87.8 PrII(3) | 88.2 NII(21) | | | | |
| | 88.8 FeII(6F) | | | 0.80/1.4 | 1.11/1.2 | 0.89/1.1 | |
| 4490.9 | AIII(7) | 91.4 FeII(37) | | 0.82/1.1 | 1.20/1.0 | 0.76/1.5 | |
| 4506.0 | CuII(1) | 06.6 NdII(7) | 06.6, 07.4 CaI(24) | | | | |
| | 06.7 TiII(30) | 06.9 SiI(2F) | 07.2 CrII(16) | | | | |
| | 07.6 NII(21) | | | 1.12/1.2 | 1.51/1.0 | 1.17/1.2 | |
| 4509.4 | CaI(24) | 10.6 FeI(6F) | 10.7 AI(9) | | | | |
| | 10.9 NIII(3) | 11.3 InI(1) | | 0.17/1.2 | 0.25/1.2 | 0.27/0.7 | |
| 4513.6 | YI(15) | 14.9 NIII(3) | 14.9 FeII(6F) | | | | |
| | 15.2 FeII(20) | 15.3 FeII(37) | | 1.43/1.2 | 2.02/1.2 | 1.74/0.8 | |
| 4518.6 | CrI(34) | 20.2 FeII(37) | | 1.57/1.1 | 2.38/1.1 | 1.67/1.3 | |
| 4521.8 | TiI(19F) | 22 OV(15) | 22.4 LaII(8) | | | | |
| | 22.6 EuII(4) | 22.6 FeII(38) | 22.8 TiI(42) | 1.13/1.0 | 1.44/1.1 | 1.08/1.1 | |
| 4526.5, | 27.3 CrI(33) | 26.9 CaI(36) | 27.2, 27.8 | | | | |
| | YI(14) | 27.3 TiI(42) | 28.0 NIV(6) | 0.26/1.4 | 0.33/1.0 | 0.34/2.0 | |
| 4533.0 | FeII(6F) | 33.2 TiII(42) | 33.3 SII(47) | | | | |
| | 34.0 TiII(50) | 34.2 FeII(37) | 34.3 | | | | |
| | MgII(26) | | | 0.43/1.4 | 0.50/1.2 | 0.36/1.7 | |
| 4539.8, | 40.5, 41.1 CrI(33) | 40.4 NeI(17) | | 0.35/1.5 | 0.48/1.5 | 0.44/0.9 | |
| 4548.8 | TiI(42) | 49.5 FeII(38) | 49.5 LaI(11) | | | | |
| | 49.8 TiII(39) | | | 2.00/1.2 | 2.85/1.1 | 1.65/1.4 | |
| 4554.8 | PII(28) | 55.0 CrII(44) | 55.3 OIII(34) | | | | |
| | 55.4 CsI(2) | 55.5 TiI(42) | 55.9 FeII(37) | | | | |
| | 55.9 CuII(1) | 56.1 NdII(6) | 56.7 NdII(12) | 2.36/1.2 | 3.70/1.2 | 2.06/1.2 | |
| 4558.0 | PII(29) | 58.5 LaII(39) | 58.6 FeII(20) | | | | |
| | 58.7, 58.8 CrII(44) | | | 0.24/1.1 | 0.29/1.4 | 0.21/0.5 | |
| 4569.5 | OIII(36) | 70.0 LaI(11) | 71.0 LaII(38) | | | | |
| | 71.1 MgI(1) | 71.2 CrII(16) | | 0.60/2.3 | 0.84/1.2 | 0.45/0.6 | |
| 4574.3 | TaI(1) | 74.8 SiIII(2) | 74.9 LaII(23) | | | | |
| | 75.5 ZrI(5) | 75.5 CaI(2F) | 76.3 FeII(38) | | | | |
| | 76.5 MoI(6) | | | 0.35/1.0 | 0.54/0.6 | 0.29/0.6 | |
| 4582.1 | FeII(19) | 82.8 FeII(37) | 83.4 TiII(39) | | | | |
| | 83.8 FeII(38) | | | 3.73/1.1 | 5.79/1.1 | 3.52/1.2 | |
| 4586.4 | VI(4) | 87.9 PIII(7) | 88.2 CrII(44) | | | | |
| | 88.4 CrII(16) | | | 0.13/ | 0.17/ | 0.07/0.8 | |
| 4605.8 | LaII(52) | 06.1 VI(4) | 07.0 FeIII(3F) | | | | |
| | 07.3 SrI(2) | | | 0.09/ | 0.10/0.8 | 0.33/1.5 | |
| 4618.8 | CrII(44) | 19.4 NV(1) | 19.8 VI(4) | | | | |
| | 20.5 FeII(38) | | | 0.28/1.0 | 0.51/0.7 | 0.27/1.2 | |
| 4628.2 | CeII(1) | 28.4 AI(9) | 28.7 PII(28) | | | | |
| | 28.8 PrII(1) | 28.9 CoI(15) | 29.3 TiII(38) | | | | |
| | 29.3 FeII(37) | 29.8 ZnI(8) | | 3.22/1.2 | 5.29/1.2 | 3.35/1.4 | |
| 4634.2, | 40.6, 41.9 NIII(2) | 37.8 CrI(32) | 38.9 OII(1) | | | | |
| | 39.2 MnII(18) | 39.7 FeII(4F) | | 8.5/5.1 | 12.8/5.4 | 13.9/ | широкая |
| 4654.6, | 55.4 OI(18) | 54.6 NII(11) | 55.8 TiII(38) | | | | |
| | 56.5 TiI(6) | | | 0.97/5.5 | 1.56/3.7 | 3.38/ | широкая |

Таблица 11 (окончание)

| Дата | 25.07.89 14-16.10.89 08.10.90 | | |
|--------------------------------|--|----------------|--------------------|
| JD 24440000 + | 7733 | 7814/6 | 8173 |
| лабораторные длины волн (Å) | элемент, состояние ионизации, номер мультиплета | | |
| | W _λ (Å)/FWHM(Å) | | |
| 4661.9, | 62.8 MoI(6) | 62.0 NaI(13) | 62.5 LaII(8) |
| | 63.1 AlII(2) | 63.5 CIII(5) | 63.7 FeII(44) |
| 4665.8 | FeII(26) | 65.8 NaI(13) | 65.9 CIII(5) |
| | 66.8 FeII(37) | 67.0 FeIII(3F) | 67.3 NII(11) |
| 4685.7 | HeII(1) | 85.8 GeI(3) | 86.0 FeI(21F) |
| 4700.8 | PII(14) | 01.2 MnI(21) | 01.5 FeIII(3F) |
| | 01.6 AlIII(6) | 02.3 Al(9) | |
| 4712.0 | NeI(16) | 12.9 LaII(38) | 13.1, 13.4 HeI(12) |
| | 13.2 FeII(26) | | |
| 4726.9 | AlII(14) | 27.5 MnI(21) | 27.9 CoI(15) |
| | 28.4 LaII(22) | | |
| 4731.4 | FeII(43) | 32.1 CoI(15) | 32.1 AlII(38) |
| | 33.0 TiII(29) | | |
| 4753.2 | ScI(5) | 54.0 MnI(16) | 54.6 PrII(4) |
| 4766.4 | MnI(21) | 67.3 TiII(29) | |
| 4773.8 | OI(16) | 73.9 CeII(17) | 74.7 FeII(20F) |
| 4812.9 | CuII(8) | 13.3 NiI(3F) | 13.9 FeIII(3F) |
| | 14.6 FeII(20F) | 14.8 GeII(2) | |
| 4861.3 | H _β | | |
| 4873.4 | CrIV(5F) | 74.5 FeII(20F) | |
| 4889.2 | ReI(1) | 89.6 FeII(4F) | 89.7 FeII(3F) |
| | 89.7 CuII(1) | | |
| 4903.7 | AlIII(11) | 04.8 Al(34) | |
| 4921.9 | HeI(48) | 23.9 FeII(42) | 24.0 ZnII(3) |
| | 24.1 SII(7) | | |
| 4957.2 | BaII(10) | 58.2 FeII(4F) | 58.3 TiI(52) |
| | 58.9 OIII(1F) | 59.1 NdII(1) | |
| 5004.9 | MnI(20) | 05.1 NII(19) | 05.2 NeI(29) |
| | 05.5 FeII(20F) | 06.2 WI(1) | |

Таблица 12. Параметры широких эмиссионных линий, зарегистрированных на ОЗСП БТА в 1989-90 годы

| Длины волн | Элемент | 25.07.89 | | | | 14-16.10.89 | | | | 8.10.90 | | | |
|---------------|----------------|-----------------------|----------------|------|----------------------------|-----------------------|----------------|------|----------------------------|-----------------------|----------------|------|----------------------------|
| | | W _λ (Å) | FWHM (км/с) | V/R | ΔV _{ea} (км/с) | W _λ (Å) | FWHM (км/с) | V/R | ΔV _{ea} (км/с) | W _λ (Å) | FWHM (км/с) | V/R | ΔV _{ea} (км/с) |
| 3889.1 | H ₈ | 1.9 | 142 | 0.65 | 39 | 3.5 | 142 | 0.64 | 62 | 1.9 | 117 | 0.62 | 72 |
| 3970.1 | H _ε | 4.4 | 264 | 0.76 | 65 | 4.8 | 260 | 0.68 | 79 | 5.0 | 140 | 0.50 | 42 |
| 4025.6 | HeII(3) | 0.67 | 777 | | 425 | 1.20 | 700 | | 362 | 2.0 | | | |
| 4101.7 | H _δ | 11.0 | 190 | 0.47 | 69 | 8.75 | 124 | 0.43 | 87 | 10.5 | 134 | 0.36 | 67 |
| 4120.8 | HeI(16) | 0.18 | 377 | | 34 | 0.27 | 379 | | 81 | 0.35 | | | |
| 4143.6 | OII(106) | 0.14 | 467 | | 109 | 0.36 | 471 | | 13 | 0.62 | | | |
| 4199.8 | HeII(3) | 0.32 | 547 | | 280 | 0.42 | 548 | | 224 | 0.33 | | | |
| 4340.5 | H _γ | 22.0 | 96 | 0.35 | 64 | 20.0 | 105 | 0.31 | 70 | 26.0 | 97 | 0.28 | 74 |
| 4471.6 | HeI(14) | 2.5 | 498 | | 114 | 3.67 | 450 | | 48 | 9.5 | | | |
| 4638.9 | OII(1) | 8.5 | 329 | | 194 | 12.8 | 351 | | 151 | 13.9 | | | |
| 4654.6 | NII(11) | 0.97 | 355 | | 341 | 1.56 | 236 | | 224 | 3.38 | | | |
| 4685.7 | HeII(1) | 1.43 | 440 | | 63 | 1.77 | - | | - | 4.63 | | | |
| 4861.3 | H _β | 31.0 | 117 | 0.30 | 60 | 42.0 | 124 | 0.27 | 78 | 45.0 | 117 | 0.21 | 74 |
| 4921.9 | HeI(48) | 1.62 | 185 | | 113 | 3.09 | - | | - | 2.35 | | | |

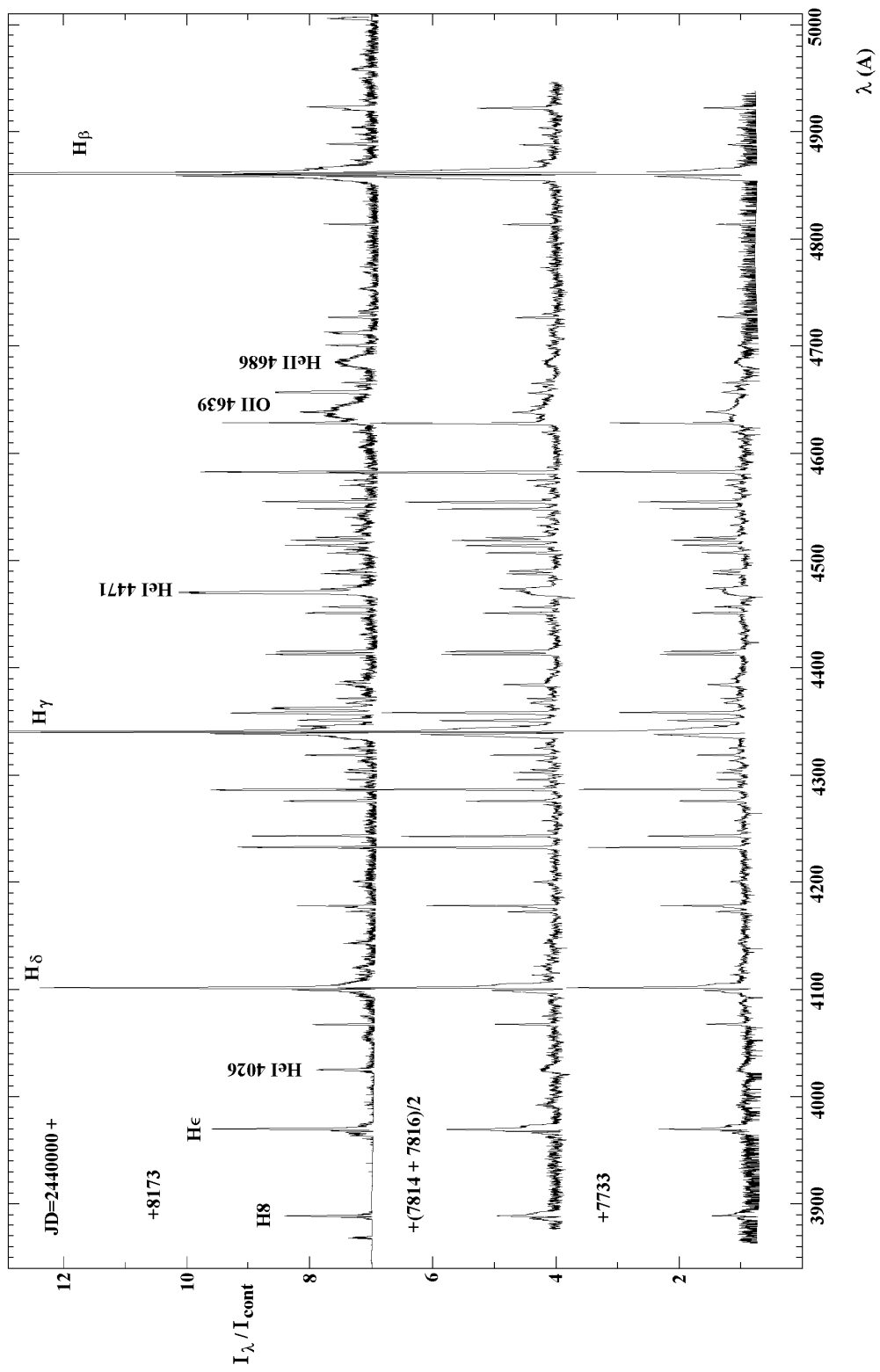


Рис. 10. Регистрограммы спектрограмм PU Vul, полученных на ОЗСП БТА.

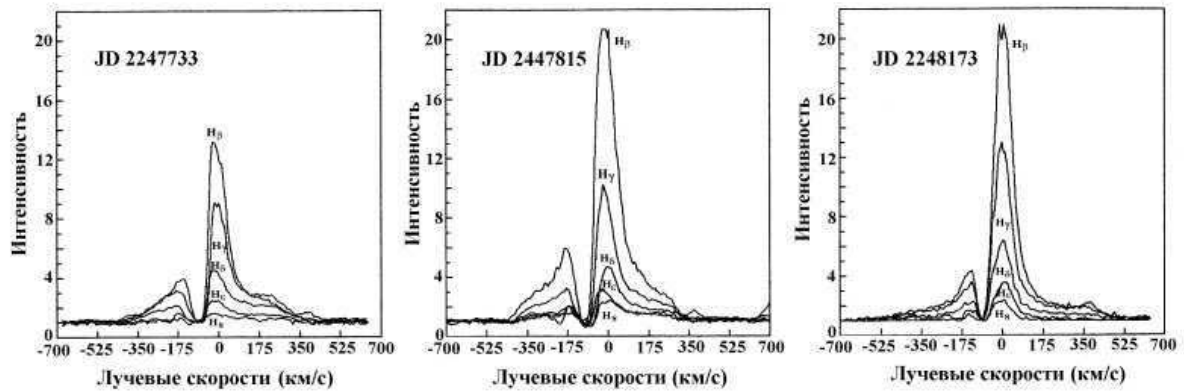


Рис. 11. Профили водородных линий, полученные на спектрограммах ОЗСП БТА.

гелия и нейтральных металлов, запрещенных линий атомов железа и хрома в разных стадиях ионизации и небулярной и авроральной линий [OIII] свидетельствует о значительном разнообразии физических условий в разных частях излучающей оболочки.

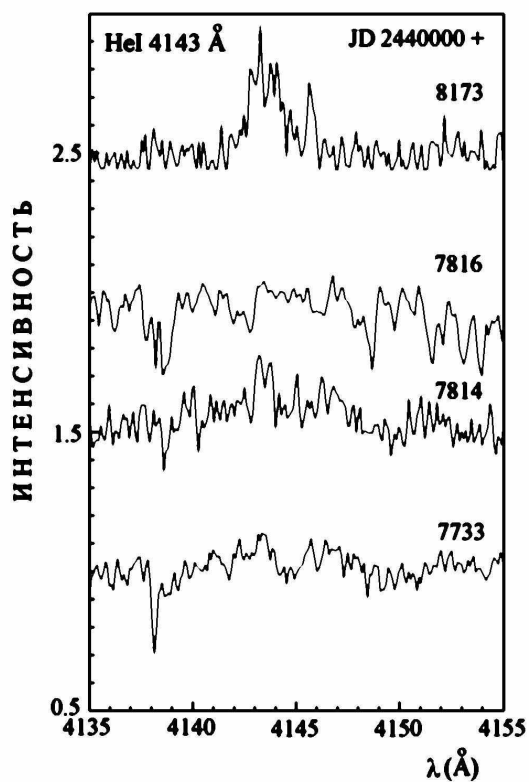
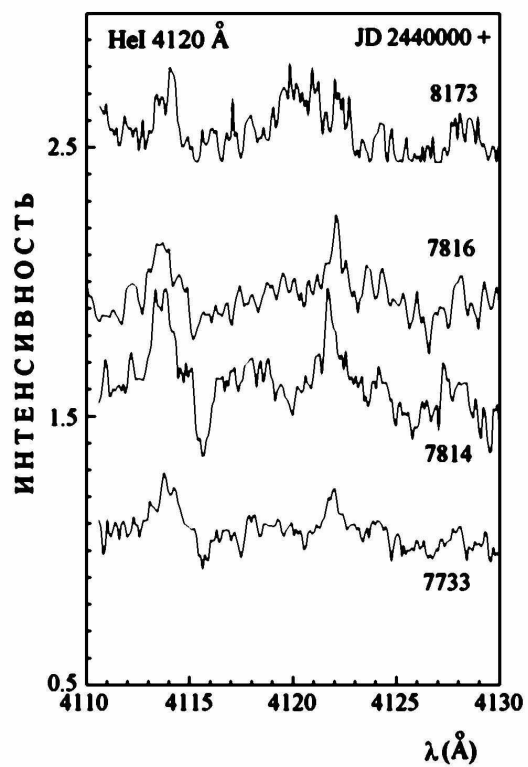
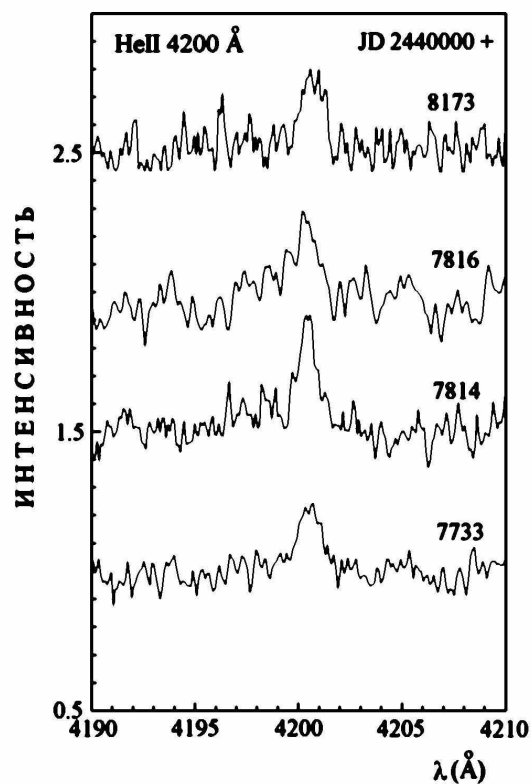
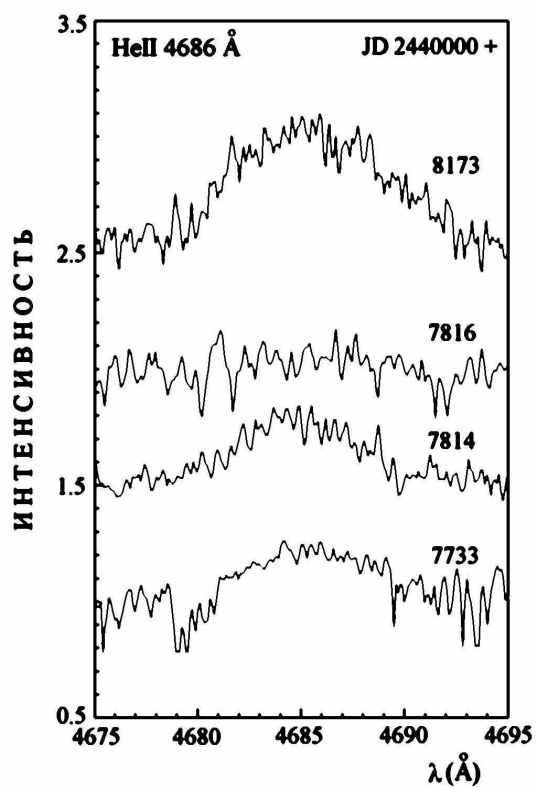
Качественно новая информация, содержащаяся в спектрах ОЗСП БТА, заключается в том, что, как видно на рис.10, на фоне большинства эмиссий с FWHM около 1-1.5 Å имеется более дюжины существенно более широких линий, причем на общем распределении эмиссионных линий по их ширинам величины FWHM широких линий четко образуют отдельную группу. На рис.11 представлены упоминавшиеся уже широкие профили водородных линий. Значительное сходство профилей разных членов Бальмеровской серии означает, что близкие к ним по длинам волн другие кандидаты, перечисленные в Таблице 11, не вносят в эти широкие профили заметный вклад.

Кроме водородных линий, еще около десятка линий гелия и кислорода также имеют профили, заметно превосходящие по ширинам инструментальный профиль. Это линия HeII(1) λ 4686 Å, которая согласно Таблице 11 может блендироваться более слабыми линиями GeI(3) и FeI(21F), и все компоненты мультиплета HeII(3), попадающие в рассматриваемый интервал длин волн: $\lambda\lambda$ 3968.4, 4025.6, 4100.0, 4199.8 и 4338.7 ÅÅ; первый, третий и пятый компоненты блендируются близкими линиями H ϵ , H δ и H γ , второй – линией HeI(18) и четвертый - линиями дважды ионизованного азота и титана и нейтрального аргона. Таким образом, линии λ 4686 Å и λ 4200 Å дают наиболее чистые профили ионизованного гелия; для указанных выше 4 дат они приведены на рис.12 и эти графики показывают существенные различия профилей линий разных мультиплетов HeII.

С линиями нейтрального гелия ситуация более сложная. Из 12 отождествленных линий этого атома две блендируются с уже упомянутыми линиями водорода и ионизованного гелия и еще 6 линий входят в число широких эмиссий: линия HeI(16) λ 4120.8 Å блендируется с триплетом OII(20), линия HeI(53) λ 4143.8 Å – с линиями YI(5), PrII(4) и LaII(54), линии HeI(14) и (15) λ 4470-72 Å – с линиями MnI(22), FeII(6F), VII(30), CeII(8) и линия HeI(48) λ 4921.9 Å - с эмиссиями FeII(42), ZnII(3) и SII(7). Все эти широкие профили представлены на четырех графиках рис.12.

Довольно узкая эмиссия λ 3868.6 Å, предположительно отождествленная с линией HeI(20) λ 3867.5, была зарегистрирована только на самом плотном негативе 8.10.90 и может быть обусловлена линией NeIII(1F). Ширины эмиссий $\lambda\lambda$ 4713.1/4 и 4387.9 ÅÅ, отождествленные с линиями HeI(12) и (51), имеют FWHM 2Å, что в полтора-два раза больше, чем у большинства металлических линий, но заметно меньше, чем у эмиссий, отмеченных как широкие.

Кроме триплета OII(20), который вместе с линией HeI(16) дает бленду λ 4120.5 Å, еще две кислородные эмиссии предположительно входят в широкие линии: OII(1) λ 4638.9 Å и дублет OI(18) λ 4655.4 Å; первую из них могут блендировать компоненты мультиплета NIII(2) $\lambda\lambda$ 4634.2, 4640,6 и 4641.9 ÅÅ. Другие эмиссии OII, относящиеся к более высоким мультиплетам, имеют FWHM от



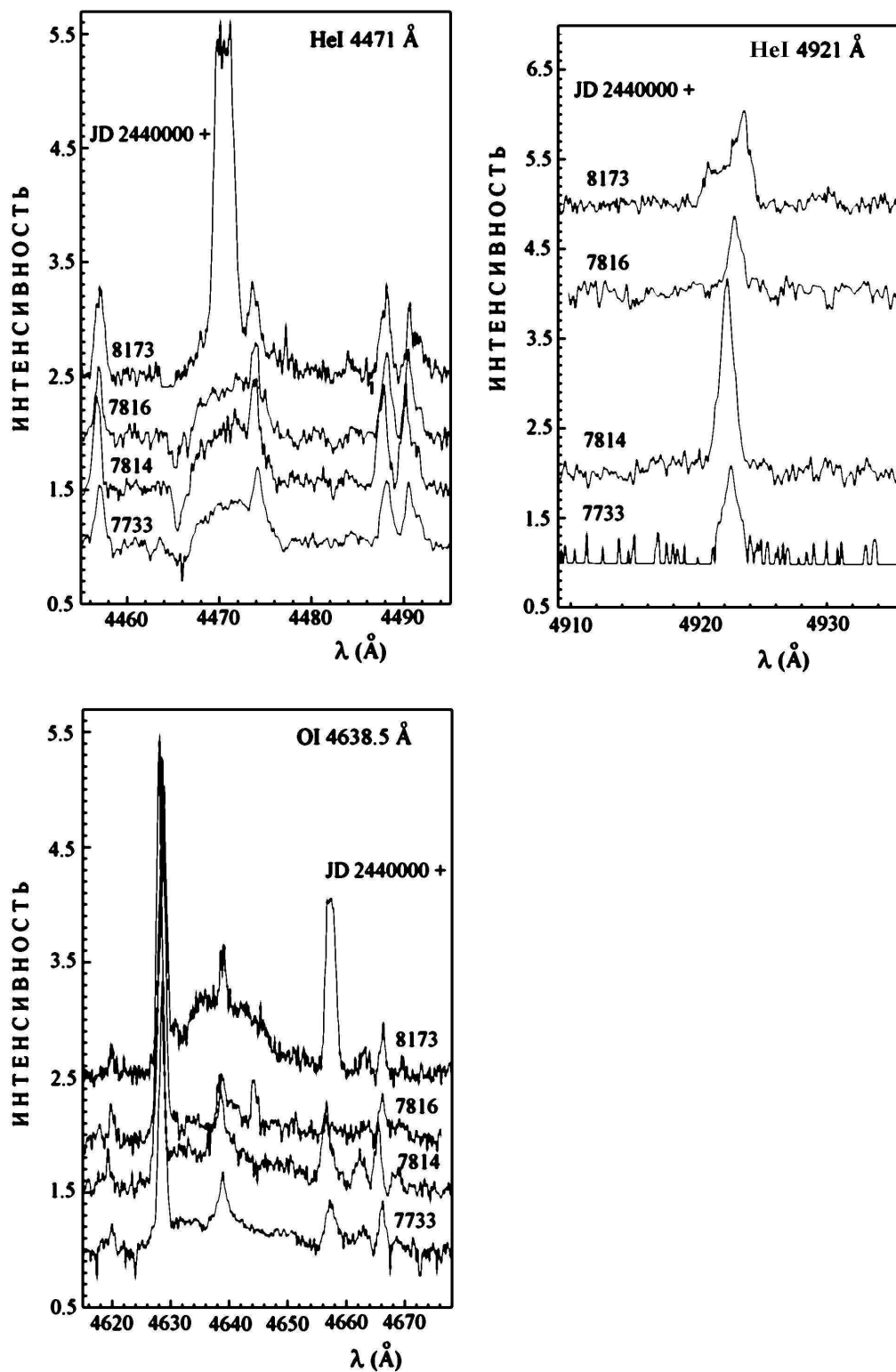


Рис. 12. Профили широких неводородных линий, полученные на спектрограммах ОЗСП БТА.

1.0 до 2.3 Å, и не исключено, что самая широкая из них обусловлена блендами с CrII(37) и OI(5). Наконец, четвертая эмиссия OI(16) λ 4773.8 Å не обнаруживает аномальную ширину. Обе широкие эмиссии с кислородными компонентами также представлены на рис.12.

В Таблице 12 собраны параметры всех 14 широких эмиссионных линий в спектре PU Vul, обнаруженных по наблюдениям на ОЗСП БТА: полные ширины на уровне половинной интенсивности FWHM в шкале скоростей, которые для водородных линий определялись по фойгтовским профилям, а для других широких линий – по аппроксимации их профилей гауссианами, отношения интенсивностей “синих” и “красных” компонентов двугорбых профилей V/R и разности скоростей центра тяжести доростроенного эмиссионного фойгтовского профиля и минимума абсорбционного компонента $\Delta V_{ea} = RV_e - RV_a$. Последние величины дают скорость расширения оболочки вспыхнувшего компонента в системе PU Vul.

Итак, спектральные наблюдения PU Vul приводят к модели неоднородного источника, состоящего из расширяющейся оболочки вспыхнувшего компонента системы и возбуждаемых излучением горячего карлика внешних слоев холодного гиганта; поэтому, обнаруженные по спектрам ОЗСП БТА широкие эмиссии естественно отождествить с излучением оболочки. Заметим, что запрещенные линии [OIII] λ 4363 Å и λ 4959 Å, с наибольшей вероятностью связанные с оболочкой, имеют FWHM 2.6 и 2.8 Å, соответствующие скоростям 179 и 169 км/с, и эти величины близки к аналогичным величинам многих линий в Таблице 12.

5 Спектры PU Vul, полученные на спектрографе куде ЗТШ

Некоторые предварительные результаты анализа ПЗС спектрограмм PU Vul, полученных на спектрографе куде ЗТШ в рассматриваемый временной интервал, были кратко описаны в статье Белякиной и др. (1990) и в докладе Ефимова и др. (1994). Здесь будет дано их более полное описание.

Все спектры, полученные на этом спектрографе, были прокалиброваны по длинам волн с помощью торий-аргоновой лампы.

5.1 Линия H_α

Спектрограммы PU Vul в области линии H_α были получены в 69 дат между 23 августа 1985 года и 4 октября 1994 года. На рис.13 показано развитие профиля этой линии на этом временном интервале. Профили построены в логарифмическом масштабе и хорошо показывают вариации интенсивности и ширины линии, изменения лучевых скоростей эмиссионной и абсорбционной составляющих сложного профиля.

Для количественного изучения характера вариаций профиля H_α все зарегистрированные профили этой линии были аппроксимированы профилями Фойгта; как уже упоминалось, такие профили строились по невозмущенному красному крылу эмиссии и по более далекой части синего крыла, где влияние абсорбционного компонента было уже пренебрежимо. На рис.14 показаны три таких профиля: довольно слабой и узкой линии в 1985 году, сильной и широкой линии, характерной для 1987-92 годов, и очень сильной, но сравнительно узкой и асимметричной линии, характерной для 1993-94 годов. С помощью такой аналитической аппроксимации зарегистрированных профилей были определены их следующие параметры: лучевая скорость центра абсорбционной компоненты RV_a , лучевая скорость центра тяжести восстановленного эмиссионного профиля Фойгта RV_e , полные ширины Фойгтовского профиля на уровнях половины и 0.1 максимальной интенсивности – FWHM и FW0.1M соответственно. На рис. 15 эти параметры сопоставлены с кривой блеска PU Vul в полосе V. На рисунке видно в среднем плавное изменение этих параметров от года к году и их быстрые вариации, коррелирующие, как правило, с вариациями блеска системы. Величины FWHM и FW0.1M изменяются синхронно и обнаруживают быстрый рост ширины эмиссионного профиля в 1987 году. Это заметное уширение совпадает с фазой перехода к небулярной стадии, когда блеск системы начал быстро падать. После 1988 года, по мере развития небулярной фазы, ширина линии H_α начала плавно уменьшаться, а признаки P Cug профиля – слабеть и исчезать.

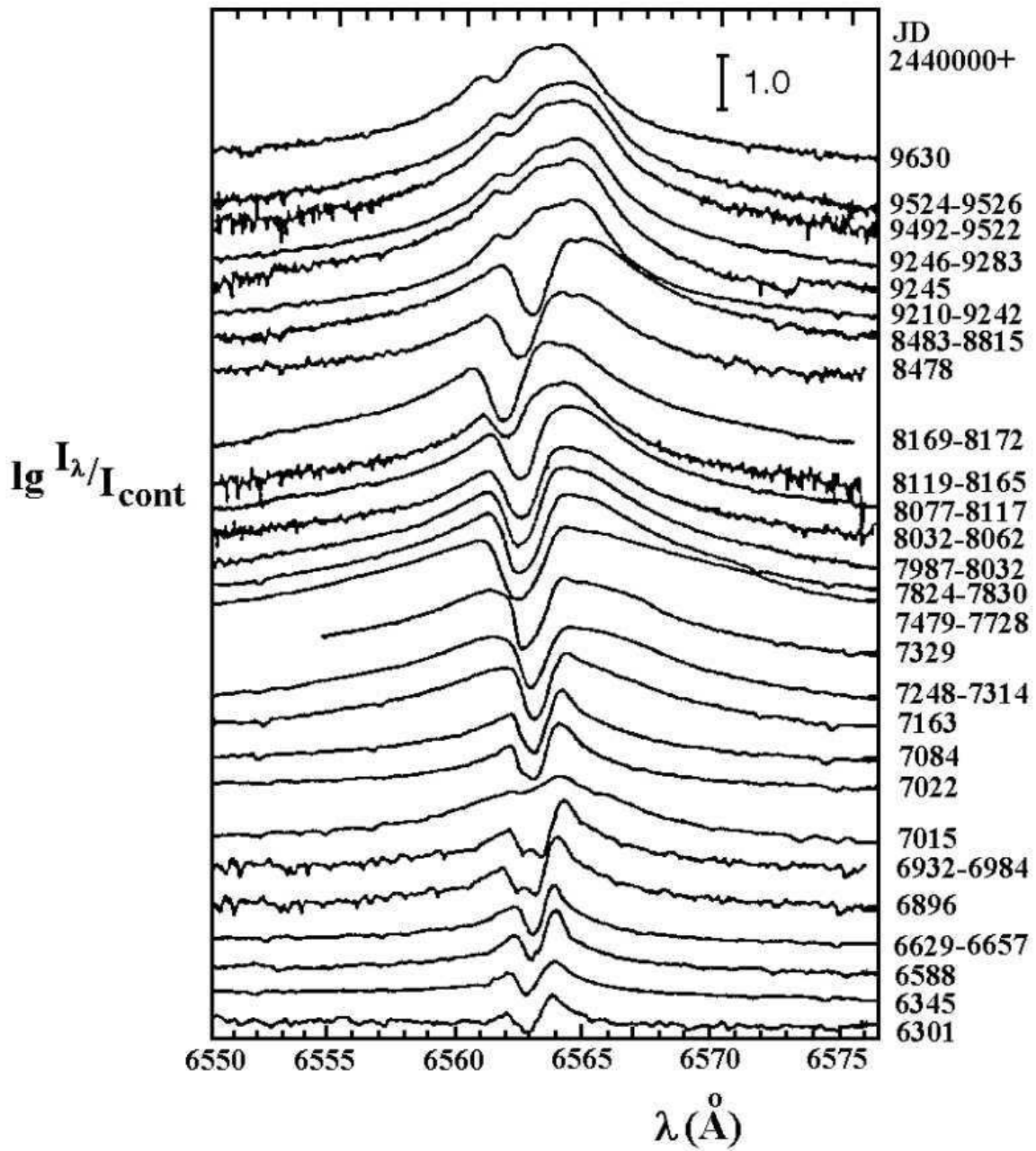


Рис. 13. Профили линии H_{α} PU Vul, зарегистрированные на спектрографе куде ЗТШ.

Лучевая скорость RV_e , соответствующая движению оболочки двойной системы в целом, также обнаруживает систематические изменения от года к году. С помощью нескольких методов мы проанализировали наш ряд величин RV_e с целью поиска возможной периодичности. Метод Диминга дал период в 9.3 года, метод Лафлера-Кинмана – период в 9.1 года и метод Левенберга-Маркардта – 11.2 ± 2.2 года; фрагмент периодической кривой, полученной последним методом, представлен

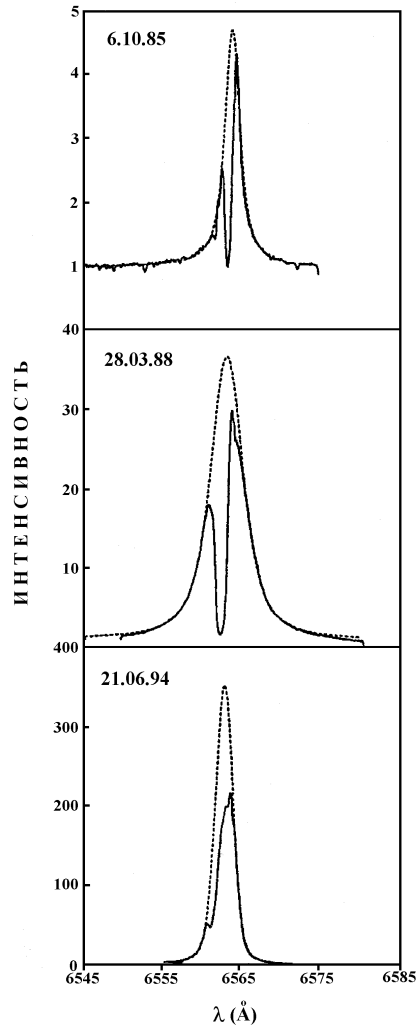


Рис. 14. Примеры аппроксимации наблюдаемых профилей линии $H\alpha$ профилями Фойгта.

на рис.15В пунктирной кривой. К последней оценке периода близок интервал между двумя последовательными затмениями (Колотилев и др., 1995).

Как уже упоминалось, на рис.15, помимо плавного изменения параметров профиля $H\alpha$, видны и быстрые вариации, их амплитуды достаточно велики и в реальности таких флуктуаций не приходится сомневаться. Очевидно, что эти вариации не укладываются в рамки модели простого расширения оболочки. Следует напомнить, что аналогичные быстрые флуктуации с амплитудой до 10 км/с на фоне плавного изменения лучевой скорости были отмечены и в загадочной до сих пор двойной системе \mathcal{E} Aur (Гершберг, 1990).

Разность $RV_e - RV_a$ дает скорость расширения оболочки в чистом виде. Рис.15Б показывает, что за время наших наблюдений эта скорость возросла от 20 до 80 км/с, причем на ее в среднем монотонный рост накладывались заметные флуктуации с характерными временами около года и меньше.

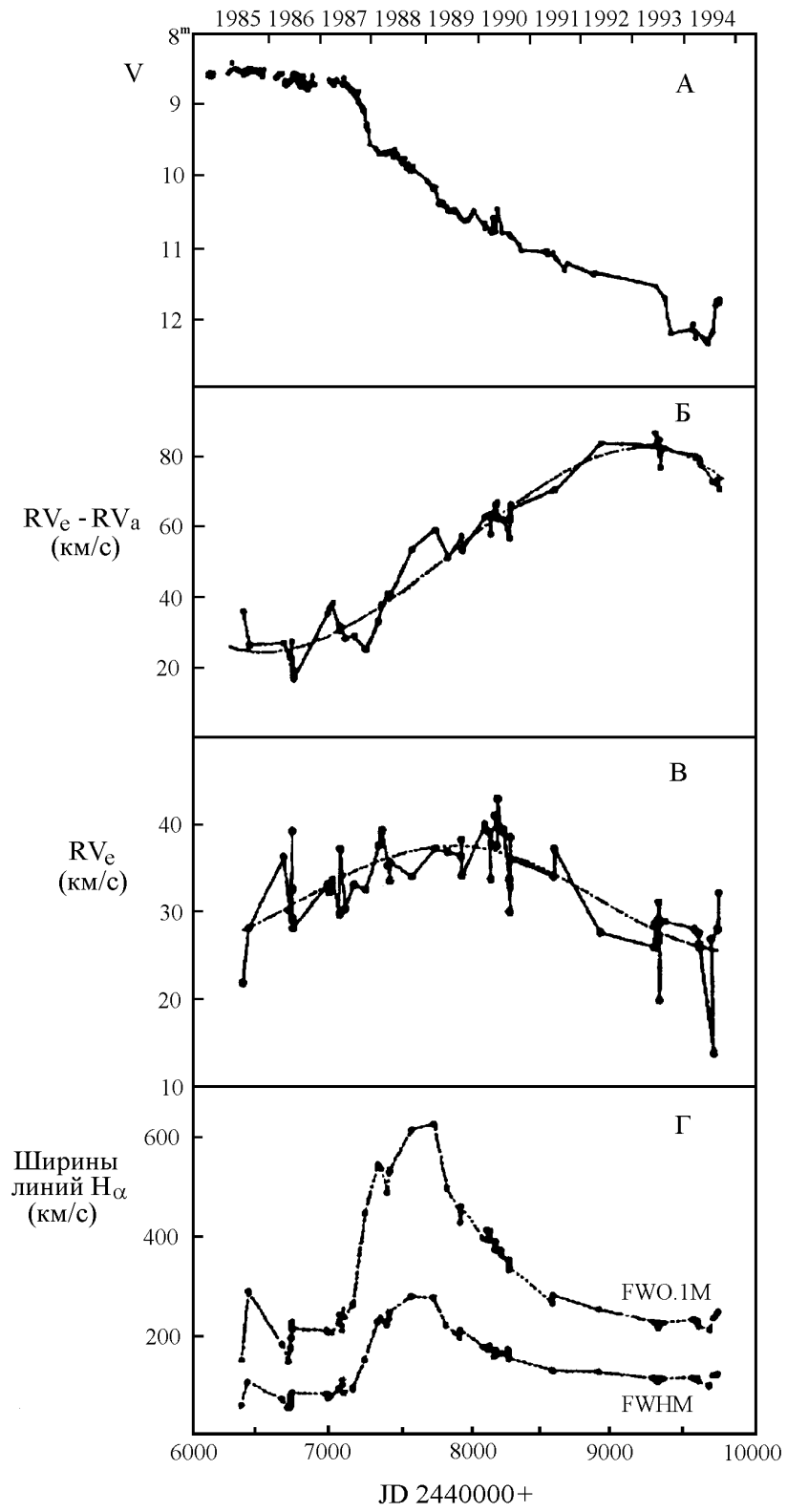


Рис. 15. Сопоставление кривой блеска PU Vul с количественными характеристиками эмиссионной линии H_α .

5.2 Линия H_β

На рис.16, аналогичном рис.13, приведены 15 профилей линии H_β , полученные на спектрографе куде ЗТШ на временном интервале от 10 августа 1986 года до 21 июня 1994 года – см. Таблицу 13.

Как и рис.13, рис.16 и Таблица 13 показывают немонокотное развитие профиля H_β . До осени 1990 года он был четко двухкомпонентным с отношениями интенсивностей компонентов V/R , которые сперва возрастали от 0.3 до 0.5, а затем уменьшались до 0.2. Но в 1993-94 годы расщепление на компоненты профиля H_β , как и профиля H_α на рис.13, становится менее выраженным. Немонотонный ход обнаруживают также ширины FWHM и FW0.1M и эквивалентная ширина H_β .

5.3 D линии гелия и натрия

Весьма существенные и сложные изменения наблюдались в спектре PU Vul в области D линий гелия и натрия – см. рис.17, где представлены 11 записей этой области, причем 5 из них получены усреднением близких по времени или по общему виду 2-4 записей. Сильные P Cуг профили линий натрия были видны в 1985-87 годы, затем они существенно ослабели или даже полностью исчезли и появились снова в 1993 году, но уже без признаков P Cуг; не исключено, что это – межзвездные линии (Кляйн и др., 1994). D линия гелия была едва заметна в начале наших наблюдений в куде ЗТШ и затем развилась в очень сильную и широкую эмиссию. Измеренные количественные характеристики всех D линий – эквивалентные ширины и лучевые скорости их эмиссионных и абсорбционных компонентов – приведены в Таблице 14. Согласно Таблице 14, разность $RV_e - RV_a$ D линии гелия в августе 1986 года достигала 50 км/с, а в первой половине 1988 года – 160 км/с. Оба эти значения лежат определенно выше соответствующих величин для H_α на рис.15. Причина этого расхождения может определяться не только реальной стратификацией оболочки, но и иным определением разности скоростей для линии гелия: здесь оценивается разность длин волн минимума и максимума профиля, а не достраивался профиль Фойгта, как на рис.14, что и может привести к завышению этой разности. Сходное поведение обнаруживают и D линии натрия.

5.4 Инфракрасный триплет ионизованного кальция

В 1986-90 годы в течение 9 ночей на спектрографе куде ЗТШ были получены спектры объекта Кувано в области инфракрасного триплета Ca II. Общий вид зарегистрированных профилей приведен на рис.18, а их количественные характеристики – в Таблице 15. (Из-за утраты некоторых архивных материалов, локализация этих профилей на оси скоростей неуверенна.) Как следует из рисунка, в 1986-87 годы компоненты триплета имели вид типичных P Cуг профилей, но к 1990 году абсорбционные компоненты исчезли, а ширины и эквивалентные ширины эмиссий многократно возросли. Переход P Cуг профилей кальциевых линий к чисто оболочечным имел место практически одновременно с таким же переходом в линии H_β , но заметно раньше, чем в линии H_α , что, видимо, обусловлено большей оптической толщиной в последней. Что же касается величин $RV_e - RV_a$ кальциевых линий, то они близки к соответствующим значениям D линий натрия.

5.5 Инфракрасная линия HeI λ 10830 Å

В 1993-94 годы в течение 8 ночей были зарегистрированы профили инфракрасной эмиссионной линии нейтрального гелия λ 10830 Å. Их измеренные характеристики приведены в Таблице 16. Согласно рис.15, эти измерения были проведены в период минимального значения $RV_e - RV_a$ линии H_α , и, согласно Таблице 16, эти разности для гелиевой линии достаточно близки к соответствующим значениям для H_α .

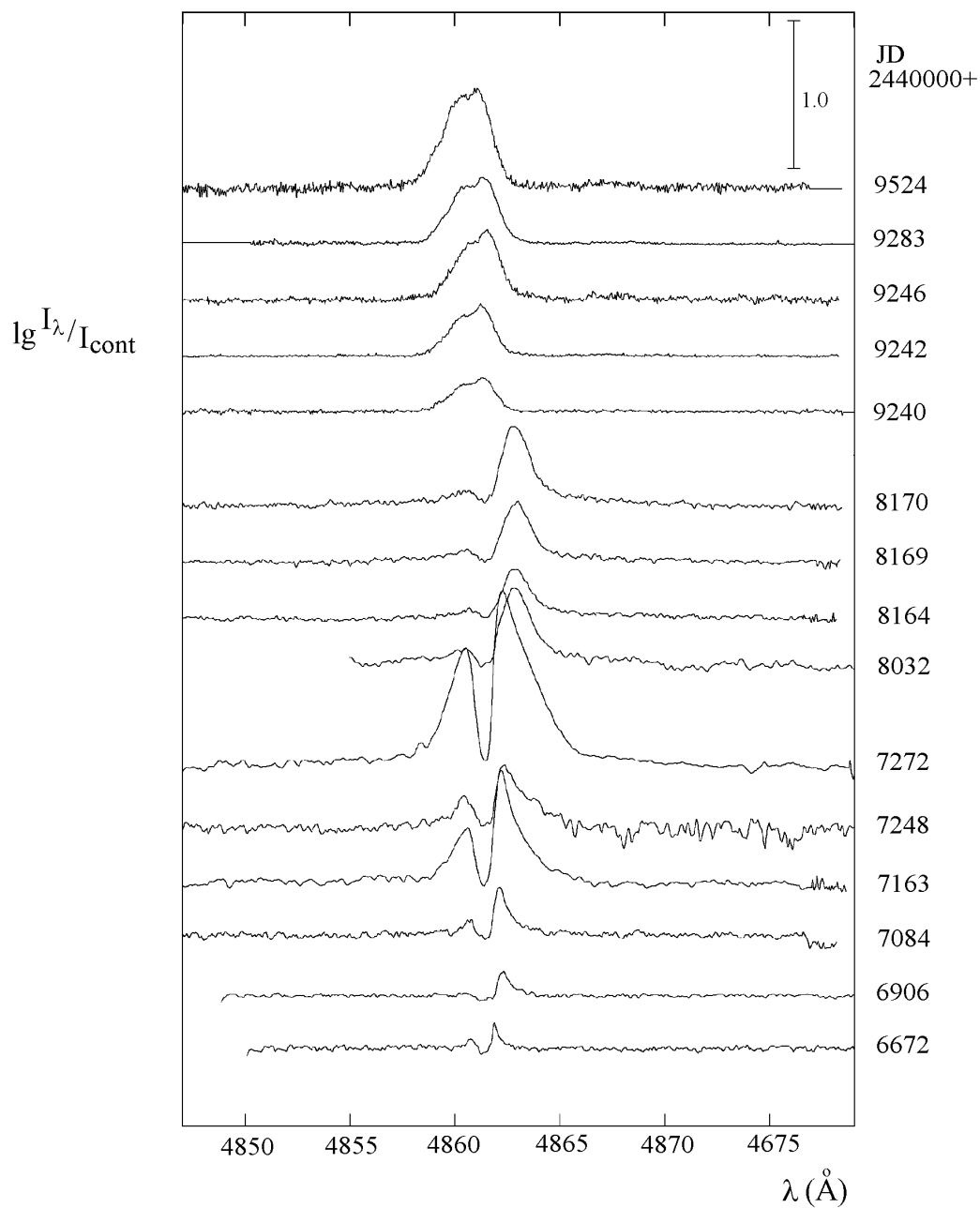


Рис. 16. Профили линии H_{β} PU Vul, зарегистрированные на спектрографе куде ЗГШ.

Таблица 13. Параметры эмиссионного профиля линии H_{β}

| Дата | JD 2440000+ | V/R | FWHM (км/с) | FW0.1M | W(A) |
|----------|----------------|------|----------------|--------|------|
| 10-08-86 | 6652 | 0.29 | 51 | 173 | 1.0 |
| 21-04-87 | 6906 | 0.45 | 51 | 262 | 1.3 |
| 15-10-87 | 7084 | 0.34 | 78 | 268 | 7.9 |
| 02-01-88 | 7163 | 0.36 | 73 | 960 | 34 |
| 28-03-88 | 7248 | 0.48 | 112 | 1060 | 20 |
| 21-04-88 | 7272 | 0.47 | 134 | 1680 | 130 |
| 20-05-90 | 8032 | 0.21 | 58 | 196 | 27 |
| 29-09-90 | 8164 | 0.26 | 87 | 483 | 11 |
| 04-10-90 | 8169 | 0.24 | 71 | 179 | 18 |
| 05-10-90 | 8170 | 0.19 | 100 | 279 | 27 |
| 09-09-93 | 9240 | 0.78 | 105 | 207 | 99 |
| 11-09-93 | 9242 | 0.78 | 100 | 218 | 190 |
| 15-09-93 | 9246 | 0.78 | 96 | 226 | 298 |
| 22-10-93 | 9283 | 0.81 | 124 | 226 | 251 |
| 20-06-94 | 9524 | 0.90 | 114 | 227 | 460 |

6 Обсуждение результатов

Описанные выше спектральные наблюдения PU Vul были начаты во время фотометрически самого спокойного состояния системы в 1985 году, они охватили двухлетнюю фазу медленного угасания вспыхнувшего компонента и последующий переход его в небулярную стадию; этот период сопровождался систематическим уменьшением блеска системы. Представленные выше наблюдения, дополненные публикациями других исследователей и нашими фотометрическими результатами, позволяют построить общую феноменологическую картину этого процесса.

Согласно рис.13 и 16, с августа 1985 года, когда были начаты наблюдения на спектрографе куде ЗТШ в области линии H_{α} , и с августа 1986 года, когда были начаты аналогичные наблюдения в области линии H_{β} , и до конца этих наблюдений в 1994 году обе эти линии постоянно находились в эмиссии. В предшествующие годы линия H_{α} , как правило, была в эмиссии различной интенсивности и с разной степенью проявления P Cug структуры, тогда как эмиссия линии H_{β} часто полностью исчезала. В последние годы крымских наблюдений в профилях этих эмиссий следы P Cug структуры практически исчезли, что можно отнести за счет исчезновения фотосферы F сверхгиганта - вспыхнувшего компонента системы, на фоне которой ранее формировались P Cug профили.

Если проинтегрировать зависимость скорости расширения оболочки на рис.15Б на временном интервале от JD...6500 – начало 1986 года – до JD...9500 – середина 1994 года, то получим оценку размера оболочки в конце этого интервала $R_{envelope} \sim 1.4 \times 10^{15}$ см. Согласно Белякиной и др. (1990) в 1985 году размер вспыхнувшего компонента был близок к $65R_{\odot}$, так что в 1994 году оболочка превысила размер исходного сверхгиганта в 300 раз. С другой стороны, согласно Хохолу и Грыгару (1987), в рамках модели стандартной двойной системы расстояние между компонентами PU Vul составляет около 1.2×10^{14} см и 0.3×10^{14} см в модели тройной иерархической системы (Хохол и др., 1996); то есть, к концу наших наблюдений в обеих моделях в расширяющуюся оболочку были погружены уже оба рассматриваемые компонента системы. Если же интегрирование провести до октября 1991 года, то получим $R_{envelope} \sim 1.0 \times 10^{15}$ см. С учетом найденной на этот момент Андрия и Узьо (1994) оценки электронной плотности оболочки $n_e \sim 6.7 \times 10^7$ см $^{-3}$, получаем массу сферической оболочки с указанным радиусом $2 \times 10^{-3}M_{\odot}$. Эта оценка может быть существенно занижена, так как вошедшая в нее величина плотности была найдена по отношению запрещенных линий, которое дает нижний предел плотности: оценки по интеркомбинационным ультрафиолетовым линиям (Фогель и Нуссбаумер, 1992) и по оптическим

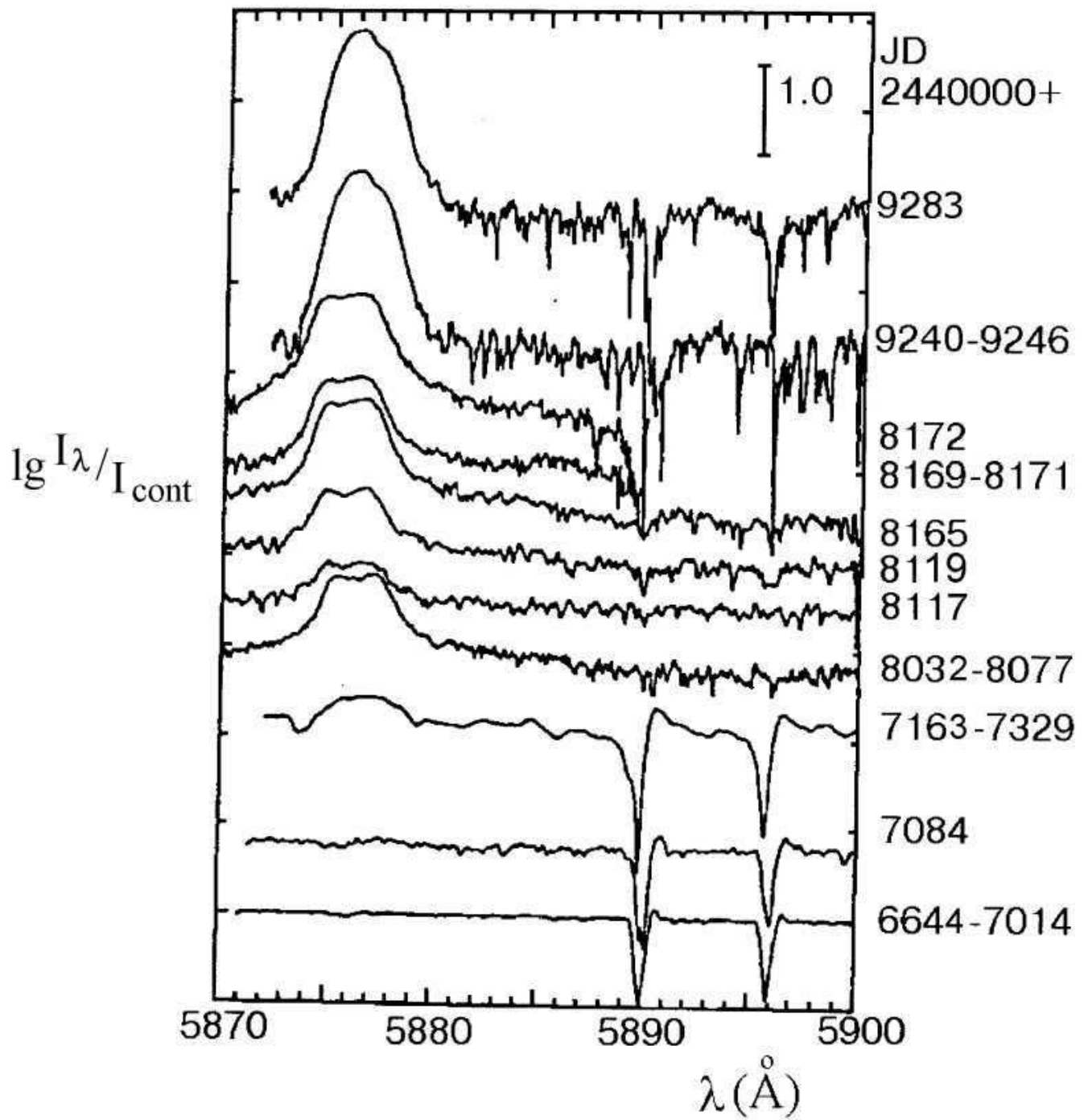


Рис. 17. Записи спектров PU Vul в области D линий натрия и гелия, зарегистрированные на спектрографе куде ЗТШ.

Таблица 14. ПЗС наблюдения на спектрографе куде Шайновского рефлектора

| Дата | JD 2440000+ | D линии гелия и натрия | | | | | | | | | | | |
|----------|----------------|------------------------|-------|------------------|--------|----------------------|-------|------------------|--------|----------------------|-------|------------------|--------|
| | | HeI λ 5876 Å | | | | NaI λ 5890 Å | | | | NaI λ 5896 Å | | | |
| | | W_e (Å) | W_a | RV_e (км/с) | RV_a | W_e (Å) | W_a | RV_e (км/с) | RV_a | W_e (Å) | W_a | RV_e (км/с) | RV_a |
| 01-08-86 | 6644 | 0.0 | 0.1 | 4 | 14 | 0.0 | 0.7 | 34 | -4 | 0.0 | 0.5 | 36 | 0 |
| 12-08-86 | 6655 | 0.0 | 0.1 | 74 | 20 | 0.1 | 0.6 | 36 | 0 | 0.0 | 0.6 | 41 | 5 |
| 06-08-87 | 7014 | | 0.1 | | 39 | 0.1 | 0.6 | 32 | -1 | 0.2 | 0.4 | 29 | -3 |
| 15-10-87 | 7084 | | 0.2 | | 20 | 0.1 | 0.8 | 66 | 20 | 0.1 | 0.6 | 66 | 27 |
| 02-01-88 | 7163 | 2.1 | 0.3 | 73 | -77 | 0.2 | 1.6 | 47 | -14 | 0.1 | 1.1 | 55 | -11 |
| 01-06-88 | 7314 | 2.0 | 0.8 | 29 | -138 | 0.5 | 0.8 | 27 | -37 | 0.2 | 0.8 | 24 | -32 |
| 16-06-88 | 7329 | | | | | 0.1 | 2.1 | 12 | -100 | 0.0 | 1.5 | 2 | -75 |
| 20-05-90 | 8032 | 36 | | 18 | 11 | | 0.7 | | -11 | | 0.6 | | -6 |
| 04-07-90 | 8077 | 36 | | 39 | 15 | | | | | | | | |
| 13-08-90 | 8117 | 6 | | 26 | 6 | | | | | | | | |
| 15-08-90 | 8119 | 17 | | 26 | 5 | | 0.4 | | -6 | | 0.5 | | 13 |
| 29-09-90 | 8164 | 38 | | 28 | -2 | | | | | | | | |
| 30-09-90 | 8165 | 58 | | 41 | 10 | | | | | | | | |
| 04-10-90 | 8169 | 24 | | 31 | 5 | | | | | | | | |
| 06-10-90 | 8171 | 29 | | 35 | 7 | | | | | | | | |
| 07-10-90 | 8172 | 56 | | 33 | 4 | | | | | | | | |
| 10-08-93 | 9210 | 37 | | 27 | | | | | | | | | |
| 09-09-93 | 9240 | 161 | | 44 | | | | | | | | | |
| 11-09-93 | 9242 | 127 | | 46 | | | | | | | | | |
| 15-09-93 | 9246 | 139 | | 51 | | | | | | | | | |
| 16-09-93 | 9247 | | | 43 | | | | | | | | | |
| 22-10-93 | 9283 | 146 | | 56 | | | | | | | | | |
| 18-06-94 | 9522 | | | 59 | | | | | | | | | |
| 11-09-94 | 9607 | | | | | | | | | | | | |
| 04-10-94 | 9630 | | | | | | | | | | | | |

линиям гелия (Прога и др., 1994) дают до двух порядков большие величины p_e . С другой стороны, модель сферически однородной оболочки может дать значительно завышенную массу – см. многочисленные фотографии планетарных туманностей и расчет оболочки Новой Лебеда 1975 (Боярчук и Гершберг, 1977), которые свидетельствуют о существенном отклонении от сферичности оболочек, сбрасываемых звездами высокой светимости.

Очевидно, что обнаруженные на спектрах ОЗСП БТА широкие линии кислорода и гелия также образуются в этой расширяющейся оболочке. Наблюдавшиеся в 1989 году Бальмеровский и Пашеновский эмиссионные декременты Андрия и Узьо (1994) представили Мензеловским случаем В при температуре 10000 К. На рис.19 приведены эмиссионные профили H_α , H_β , D и инфракрасной линий гелия, зарегистрированные в близкие даты в июне 1994 года. Протяженные крылья в коротковолновой области естественно связать с расширением оболочки со скоростью до 150-200 км/с, а более крутой ход длинноволновых крыльев – с экранированием холодным гигантом удаленной части оболочки. Общая для всех профилей небольшая депрессия в центре может быть обусловлена отклонением оболочки от сферической симметрии.

Эволюция большинства неводородных линий в спектре PU Vul несравненно богаче событиями. Как известно, в ходе развития этого объекта несколько раз регистрировалось временное существенное ослабление абсорбционных линий ряда металлов: в апреле – октябре 1979 года, с ноября 1982 по июль 1984 года, в сентябре 1984 года, в августе 1985 года, в мае 1986 года (Ямашита и др., 1982, 1983, 1984; Беякина и др., 1990; Канамицу, 1991; Канамицу и др., 1991). (Из-за несистематичности спектральных наблюдений можно подозревать, что эпизод 1982-84 годов

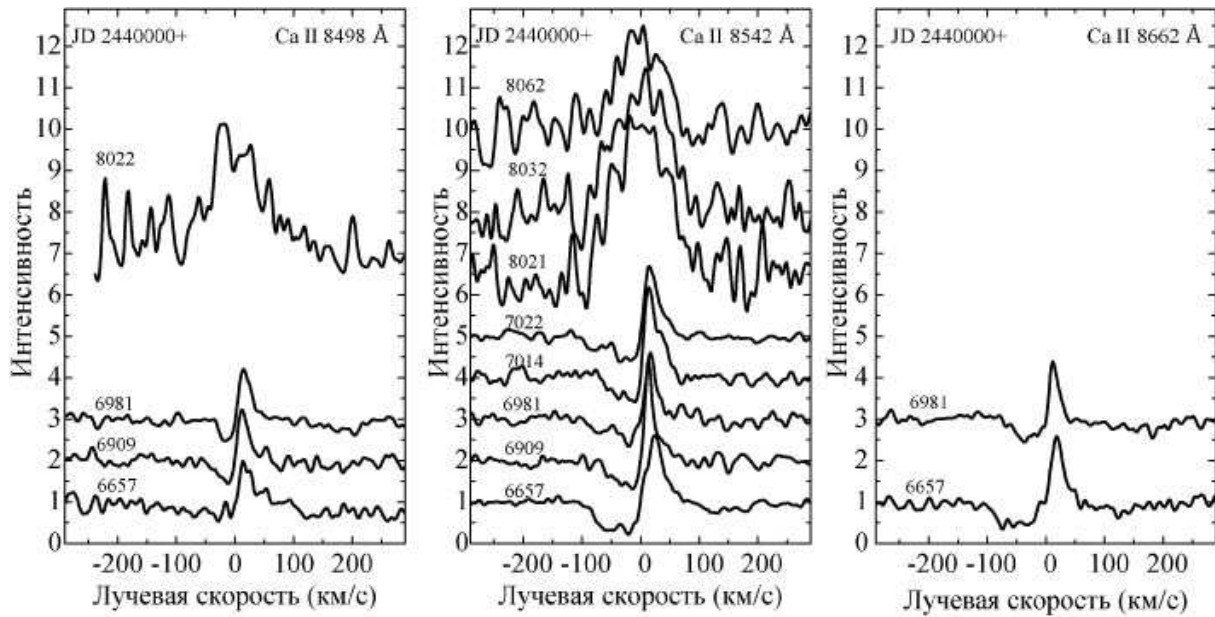


Рис. 18. Записи спектров PU Vul в области инфракрасного триплета ионизованного кальция, зарегистрированные на спектрографе куде ЗТШ.

Таблица 15. ПЗС наблюдения на спектрографе куде Шайновского рефлектора

| IR CaII | | | | | |
|----------|----------|-----------|-------|-------|---------------|
| Дата | JD | λ | W_e | W_a | $RV_e - RV_a$ |
| | 2440000+ | (Å) | (Å) | | (км/с) |
| 14-08-86 | 6657 | 8662 | 0.7 | 1.4 | 58 |
| 14-08-86 | 6657 | 8498 | 0.7 | 0.7 | 29 |
| 24-04-87 | 6909 | 8542 | 0.6 | 0.5 | 39 |
| 24-04-87 | 6909 | 8498 | 0.5 | 0.6 | 29 |
| 05-07-87 | 6981 | 8498 | 0.6 | 0.7 | 22 |
| 05-07-87 | 6981 | 8542 | 1.0 | 1.4 | 37 |
| 05-07-87 | 6981 | 8662 | 0.6 | 1.0 | 39 |
| 07-08-87 | 7015 | 8542 | | | 43 |
| 07-08-87 | 7015 | 8498 | | 1.2 | |
| 14-08-87 | 7022 | 8542 | | | 37 |
| 09-05-90 | 8021 | 8542 | 4.0 | | |
| 10-05-90 | 8022 | 8498 | 5.0 | | |
| 20-05-90 | 8032 | 8542 | 2.0 | | |
| 19-06-90 | 8062 | | | | |

состоял из нескольких более коротких таких событий.) В некоторых из перечисленных эпизодов было зарегистрировано появление эмиссий металлов (Ииджима и Ортолани, 1984; Колотилов, 1984). Некоторым из этих событий предшествовали небольшие поярчания системы и понижения показателя цвета U-B. Важно отметить, что в различных эпизодах ослабление абсорбционных линий происходило по-разному и неодновременно. Наибольшие вариации – почти до полного исчезновения – обнаружили линии нейтрального и ионизованного железа, тогда как сильные абсорбции TiII, ScII, SrII, CaI λ 4227 Å сохранялись или ослаблялись в меньшей степени и с некоторым временным

Таблица 16. ПЗС наблюдения на спектрографе куде Шайновского рефлектора

| HeI λ 10830 Å | | | | | |
|-----------------------|----------|------|--------|--------|---------------|
| Дата | JD | V/R | FWHM | FW0.1M | $RV_e - RV_a$ |
| | 2440000+ | | (км/с) | | (км/с) |
| 08-09-93 | 9239 | 0.12 | 131 | 315 | 86 |
| 09-09-93 | 9240 | 0.15 | 97 | 318 | 110 |
| 15-09-93 | 9246 | 0.11 | 102 | 268 | 79 |
| 16-09-93 | 9247 | | | | |
| 22-10-93 | 9283 | | | | |
| 22-06-94 | 9526 | 0.09 | 109 | 283 | 80 |
| 23-09-94 | 9619 | | | | |
| 04-10-94 | 9630 | | | | |

сдвигом.

Эпизоды временного ослабления абсорбций и появления на их местах эмиссий естественно рассматривать как неудачные попытки перехода вспыхнувшего компонента системы в небулярную стадию. Конкретный физический смысл этих “неудач” остается неясным. Однако, можно думать, что имеет место связь этих спектральных особенностей с обнаруженной широкополосной многоцветной фотометрией немонотонностью возвращения вспыхнувшего компонента системы в состояние горячего компактного объекта: в течение нескольких лет процесс повышения температуры и уменьшения размера его фотосферы проходил в виде дискретных событий, которые наблюдались как заметные поглубления системы с характерными временами порядка одного-двух месяцев (Белякина и др., 1990). Общий дрейф системы PU Vul на диаграмме U-B, B-V от F сверхгиганта к горячему чернотельному объекту четко представлен на рис.6 в работе Белякиной и др. (2000).

После очередного ослабления в спектре PU Vul почти всех абсорбционных линий весной 1987 года (Ииджима, 1989; Канамицу и др., 1991), во второй половине этого года, как показывает рис.1, началось систематическое уменьшение блеска системы в полосе V и произошел всплеск многочисленных эмиссионных линий FeII и [FeII] (Ииджима, 1989; Ямашита и Норимото, 1993; Майтцен и др., 1987). В январе-марте 1988 года к линиям железа добавились эмиссии HeI, [SII], SiII, TiII, CrII и MgII, Бальмеровская серия прослеживалась до H₁₅, но в мае в желто-красной области был зарегистрирован абсорбционный спектр с единственной эмиссией H _{α} – см. рис.3. По-видимому, это был последний период наблюдений большого числа абсорбций в оптическом диапазоне спектра системы и, согласно Канамицу (1991), он продолжался до ноября 1988 года. Во всяком случае, абсорбций нет на наших спектрах, полученных на ОЗСП БТА в июле 1989 года и позднее, и, согласно наблюдениям Кляйна и др. (1994), которые охватили и более длинноволновую область спектра, единственной абсорбционной деталью в оптическом спектре PU Vul в ноябре 1989 года были межзвездные D линии натрия. Как показывает рис.6, с ноября 1988 года по сентябрь 1990 года на Кассегреновских спектрах ЗТШ определенно сохранялась абсорбция около λ 6870 Å, предположительно отождествленная с BaII. В сине-зеленой области длин волн уже в начале 1988 года Канамицу и др. (1991) зарегистрировали большое число эмиссионных линий.

Согласно широкополосной многоцветной фотометрии Белякиной и др. (2000), в полосах НКЛМ вариации блеска PU Vul в течение 1986-1994 годов были невелики. Это означает, что в ИК области преобладало излучение холодного гиганта, и изменения состояния вспыхнувшего компонента практически не влияли на общий блеск системы в этом диапазоне длин волн. Эти фотометрические выводы подтверждаются спектральным обнаружением ИК полос поглощения CO, OH и TiO (Бенсаммар и др., 1991; Шилд и др., 1992; Кенион, 1996), свойственных холодным гигантам, и по полосам TiO такой компонент системы PU Vul классифицируется как M6.8 III или M6.5 III по его цветовой температуре (Белякина и др., 1985).

Таким образом, общий характер развития спектра PU Vul, можно представить как результат

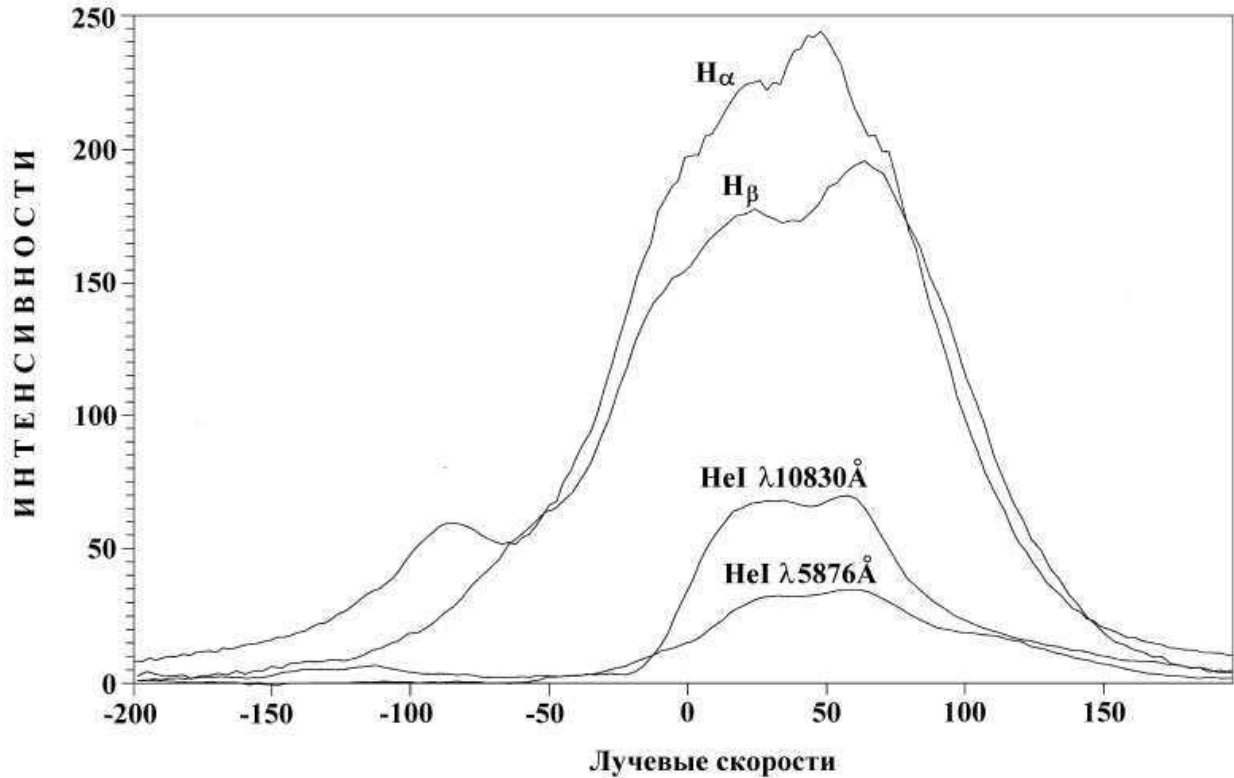


Рис. 19. Эмиссионные профили H_{α} , H_{β} , D и инфракрасной линии гелия 19-23 июня 1994 года.

расширения оболочки вспыхнувшего компонента системы, систематического понижения уровня и повышением температуры его фотосферы, благодаря чему, под влиянием нарастающего высоко температурного излучения, формируется небулярный спектр. Более поздние наблюдения Андрия и Узьо (1994, 1995) обнаружили дальнейшее усиление эмиссионных линий высокого возбуждения. Так, в 1992 году и позднее они зарегистрировали широкие полосы NIV λ 4053 и λ 7109-23 Å и CIV λ 802-12 Å и сильную эмиссию [AIV] λ 4740 Å, которые определенно еще не были видны на наших спектрах в 1990 году. По спектрам в далеком ультрафиолете Сайон и др. (1993) и Нуссбаумер и Фогель (1996) обнаружили истечение горячего звездного ветра со скоростью до 600-1000 км/с, характерное для звезд Вольфа-Райе, и свойственные таким звездам характеристики PU Vul в оптическом диапазоне были отмечены Томовым и др. (1991).

Одновременно с развитием высокотемпературного спектра возбуждается эмиссия нейтральных и слабо ионизованных ионов, возможная причина этого явления – взаимодействие расширяющейся оболочки с сильным звездным ветром холодного гиганта (Канамицу, 1991). О сложной кинематической структуре расширяющейся оболочки свидетельствуют и указания на биполярные истечения, обнаруженные Бенсаммаром и др. (1991).

Иными словами, с появлением небулярного спектра PU Vul происходит наглядное формирование признаков классической симбиотичности. Временное исчезновение эмиссии HeII λ 686 Å в течение затмения холодным гигантом вспыхнувшего компонента в 1993-94 годы (Гарнович, 1994; Гарнович

и Траммелл, 1994) и сходство спектров системы до и после этого затмения (Колотилов и др., 1995) являются прямым подтверждением рассматриваемой модели PU Vul.

Большая предварительная работа по анализу описанных выше спектров PU Vul была проведена безвременно ушедшим А.Г.Щербаковым. До последних дней он продолжал интенсивно работать на установленном рядом с постелью компьютере и обмениваться письмами по электронной почте. Светлой памяти нашего соавтора и товарища, отца одного из нас мы посвящаем это исследование.

Мы глубоко благодарны В.Д.Бычкову, Г.А.Гарбузову, В.П.Гринину, В.Г.Елькину, Ю.Ф.Малькову, П.П.Петрову, С.И.Плачинде, В.И.Пронику, С.И.Ростопчину, И.С.Саванову, С.Г.Сергееву, А.Е.Тарасову, Е.Л.Ченцову, К.К.Чуваеву, Н.И.Шаховской за участие в спектральных наблюдениях PU Vul. С.И.Плачинда и С.Г.Сергеев помогли нам в дешифровке ряда файлов из архива А.Г.Щербакова. Это исследование выполнено частично при поддержке грантами R2Q000 и R2Q200 Международного Научного Фонда Дж.Сороса и грантом А-05-067 программы СЕЕ ESO. Мы благодарны Л.С.Любимкову за полезные замечания, А.В.Теребиж и Л.И.Филатовой за помощь в подготовке статьи к печати.

Литература

- Андрийа и Узьо (Andtillat Y. and Houziaux L.) // Monthly Notices RAS. 1994. V.271, P.875.
 Андрийа и Узьо (Andtillat Y. and Houziaux L.) // IBVS. 1995. N. 4251.
 Белякина Т.С., Ефимов Ю.С., Павленко Е.П., Шенаврин В.И. // Астрон.журнал. 1982а. Т.59 С.1.
 Белякина Т.С., Гершберг Р.Е., Ефимов Ю.С., Краснобабцев В.И., Павленко Е.П., Петров П.П., Чуваев К.К., Шенаврин В.И. // Астрон.журнал. 1982б. Т.59. С.302.
 Белякина и др. (Belyakina T.S., Bondar N.I., Chochol D., Chuvaev K.K., Efimov Yu.S., Gershberg R.E., Grygar J., Hric L., Krasnobabtsev V.I., Petrov P.P., Piirola V., Savanov I.S., Shakhovskaya N.I., Shakhovskoj N.M. and Shenavrin V.I.). // Astron.Astrophys. 1984. V.132. L12.
 Белякина Т.С., Бондарь Н.И., Гершберг Р.Е., Ефимов Ю.С., Краснобабцев В.И., Петров П.П., Пиирола В., Саванов И.С., Чуваев К.К., Шаховская Н.И., Шаховской Н.М., Шенаврин В.И. // Известия Крымской астрофиз.обс. 1985. Т.72. С.3.
 Белякина Т.С., Бондарь Н.И., Гершберг Р.Е., Гриц Л., Грыгар И., Ефимов Ю.С., Краснобабцев В.И., Пиирола В., Поутанен М., Саванов И.С., Туоминен И., Хохол Д., Чуваев К.К., Шаховская Н.И., Шаховской Н.М., Шенаврин В.И., Щербаков А.Г. // Известия Крымской астрофиз.обс. 1990. Т.81. С.28. (В сокращенном виде опубликовано в Astron.Astrophys. 1989. V.223. P.119)
 Белякина Т.С., Бурнашев В.И., Гершберг Р.Е., Ефимов Ю.С., Шаховской Н.М., Шенаврин В.И. // Известия Крымской астрофиз. обс. 2000. Т.96. С.22.
 Бенсаммар и др. (Bensammar S., Friedjung M., Chauville J., Letourneur N.). // Astron.Astrophys. 1991. V.245 P.575.
 Боярчук А.А. и Гершберг Р.Е. // Астрономический журнал. 1977. Т.54. С.488.
 Гарнавич (Garnavich P.). // IAU Circular. 1994. N.5969.
 Гарнавич и Траммелл (Garnavich P. and Trammell S.R.). // IAU Circular. 1994. N.6089.
 Гершберг Р.Е. // Астрон.журнал. 1990. Т.67. С.76.
 Гершберг Р.Е. // Известия Крымской астрофиз. обс. 2000. Т.96. С.4.
 Ефимов Ю.С. и др. (Efimov Yu.S., Gershberg R.E., Savanov I.S., Shcherbakov A.G., Shcherbakov V.A.) // Flares and flashes. Lecture Notes in Physics./Eds. J.Greiner, H.W.Duerbeck and R.E.Gershberg. Springer. 1995. V.454. P.255.
 Ииджима (Iijima T.). // Astron.Astrophys. 1989. V.215. P.57.
 Ииджима и Ортолани (Iijima T. and Ortolani S.). // Astron. Astrophys. 1984. V.136. P.1.
 Канамицу (Kanamitsu O.). // Publ.Astron.Soc.Japan. 1991. V.43. P.225.
 Канамицу и др. (Kanamitsu O., Yamashita Y., Norimoto Y., Watanabe E. and Yutani M.). // Publ.Astron.Soc.Japan. 1991. V.43. P.523.
 Кенион (Kenyon S.J.).//Astron.J. 1986. V.91. P.563.
 Кляйн и др. (Klein A., Bruch A. and Luthardt R.). //Astron.Astrophys.Suppl.Ser. 1994. V.104. P.99.

- Колотилов Е.А. // Письма в Астрон.журнал. 1984. Т.10. С.284.
- Колотилов и др.(Kolotilov E.A., Munari U. and Yudin B.F.). // Monthly Notices RAS. 1995. V.275. P.185.
- Майтцен и др. (Maitzen H.M., Schnell A. and Horn J.). // IAU Circ. 1987. N.4474.
- Мур (Moore C.E.). // Contr.Princeton Univ.Obs. 1945. N. 20.
- Нуссбаумер и Фогель (Nussbaumer H. and Vogel M.). //Astron.Astrophys. 1996. V.307. P.470.
- Прога и др. (Proga D., Mikolajewska J. and Kenyon S.J.). //Monthly Notices RAS. 1994. V.268. P.213.
- Сайон и др. (Sion E.M., Shore S.N., Ready C.J., Scheible M.P.). // Astron.J. 1993. V.106. P.2118.
- Томов и др. (Томов Т., Zamanov R., Iliev I., Mikolajewski M., Georgiev L.). // Monthly Notices RAS. 1991. V. 252. P.31.
- Фогель и Нуссбаумер (Vogel M. and Nussbaumer H.). //Astron.Astrophys. 1992. V.259. P.525.
- Хохол и Грыгар (Chochol D. and Grygar J.). //Astrophys.Space Sci. 1987. V.131. P.487.
- Хохол и др. (Chochol D., Tamura S., Kanamitsu O., Pribulla T., Tajitsu A.). //Cataclysmic variables and related objects. Proc.158 IAU Coll. June 26-30, 1995. Keele.UK. /Eds. A.Evans and J.H.Wood. Kluwer Acad.Publ. 1996. P.343.
- Хувелин и др. (Huovelin J., Poutanen M., Tuominen I.). // Helsinki Univ.of Techn.Radio Lab.Rep. 1986. S166. P.18.
- Шилд и др. (Schild H., Boyle S.J. and Schmid H.M.). // Monthly Notices RAS. 1992. V.258. P.95.
- Ямашита и Норимото (Yamashita Y. and Norimoto Y.). // Publ.Nat.Astron.Obs.Japan. 1993. V.3. P.93.
- Ямашита и др. (Yamashita Y., Maehara H. and Norimoto Y.). // Publ.Astron.Soc. Japan. 1982. V.34. P.269.
- Ямашита и др. (Yamashita Y., Norimoto Y. and Yoo K.H.). // Publ.Astron.Soc. Japan. 1983. V.35. P.521.
- Ямашита и др. (Yamashita Y., Norimoto Y. and Watanabe E.). // Частное сообщение. 1984.