

## ПОИСКИ ЛИНИЙ ТЯЖЕЛЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В СПЕКТРЕ Ар-ЗВЕЗДЫ $\nu$ Cnc (HD 77350)

Ю. В. Глаголевский, К. И. Козлова

Для звезды  $\nu$ Cnc = HD 77350 (B9p, Si—Cr—Sr) в области  $\lambda\lambda$  3850—4650 Å по десяти спектрам с дисперсией 8 Å/мм обнаружены линии тяжелых химических элементов ( $z \geq 74$ ): W I, Os I, II и Hg I, II.

The lines of heavy chemical elements ( $z \geq 74$ ): W I, Os I, Os II, Hg I and Hg II have been detected for the star  $\nu$ Cnc = HD 77350 (B9p, Si—Cr—Sr) in the region  $\lambda\lambda$  3850—4650 Å from ten spectrograms with a dispersion of 8 Å/mm.

Поиски линий тяжелых химических элементов ( $z \geq 74$ ) в спектрах пекулярных Ар-звезд приобрели в настоящее время большой научный интерес. Уже получены данные о содержании в атмосферах Ар-звезд вольфрама [1—3], осмия (Os I, Os II) [1, 3—7], ртути (Hg I, Hg II) [2, 8—10], трансурановых [4] и других элементов, что указывает, как известно, на существование в прошлом или на наличие в настоящее время ядерного синтеза с медленным ( $s$ -процессом) или с быстрым ( $r$ -процессом) захватом нейтронов [11]. Известно, что  $r$ -процесс является единственным в природе, ответственным за производство сверхтяжелых химических элементов ( $z > 83$ ). Поэтому очень важно получить больше информации о присутствии и свойствах тяжелых и сверхтяжелых элементов, которые, по-видимому, наблюдаются только в атмосферах Ар-звезд. Эти сведения открывают новые возможности в теории эволюции Ар-звезд и в происхождении химических аномалий в их атмосферах.

Звезда  $\nu$ Cnc (HD 77350, Sp=9p, типа Si—Cr—Sr,  $v \sin i = 16$  км/сек.) имеет сравнительно небольшое магнитное поле (He), изменяющееся в пределах 105—470 гс [12]. В нашем предыдущем исследовании этой звезды [13] были получены данные о переменности интенсивностей и лучевых скоростей некоторых спектральных линий и был найден период этих изменений  $P = 4^d.191$ . Несмотря на небольшие спектральные изменения  $\nu$ Cnc, их характер соответствует общим свойствам Ар-звезд. Фотометрическая переменность  $\nu$ Cnc не превышает  $\Delta m = 0^m.006$  [14].

**Результаты исследования.** Спектры  $\nu$ Cnc с дисперсией 8 Å/мм (10 шт.) в области  $\lambda\lambda$  3850—4650 Å получены на ЗТШ Крымской астрофизической обсерватории АН СССР. Поиск линий тяжелых элементов проводился по регистрограммам, полученным на микрофотометре с записью в прямых интенсивностях с увеличением 50 раз. Для отождествления линий использовались каталоги [15—19] и работы [1—11, 20]. Найденная линия считалась достоверной, если она обнаруживалась более чем на 5 спектрах из 10. Наиболее слабая линия, которую мы могли уверенно выделить среди «шумов» фотопластинки, имела эквивалентную ширину  $W_\lambda > 7 \div 9$  мÅ. Названия элементов отождествленных линий, их длины волн ( $\lambda$ ) и эквивалентные ширины ( $W_\lambda$ ), а также замечания по возможному блендированию и другие данные приведены в табл. 1. Спектр  $\nu$ Cnc богат линиями,

ТАБЛИЦА 1

Элемент	Потенциал ионизации, эВ	$\lambda$ , Å	Потенциал возбуждения, эВ	Номер мультиплета	$W$ , мÅ	Число спектральных линий $n$	$\log gf$ [21]	Примечания
W I $z=74$	7.98	4008.77	0.36	6	11	6	+3.24	Блендируется с Ti I $\lambda$ 4008.92 ( $M=12$ ), остальные линии из мультиплета $M=12$ представлены в блендах. Линия W I ( $M=6$ ) имеется в спектре Солнца [18]
		4074.36	0.36	6	8	6	+2.97	Блендируется с Ti I $\lambda$ 4074.36 ( $M=254$ ), остальные линии из мультиплета $M=254$ представлены в спектре, из них две линии Ti I $\lambda\lambda$ 4060.09 и 4068.66 не блендированные, остальные находятся в блендах. Линия W I (6) имеется в спектре Солнца [18]
		4294.62	0.36	6	13	6	+3.00	Линия уверенная. Слегка блендируется с Zr I $\lambda$ 4294.78 ( $M=45$ ). Линия W I $\lambda$ 4294.62 имеется в спектре Солнца [18]
		4302.13	0.36	7	7	5	+2.56	Расположена на крыле линии Ti II $\lambda$ 4301.93 ( $M=41$ )
		4244.37	0.77	1	12	6	+2.37	Сливается с Cr I $\lambda$ 4244.33 ( $M=240$ ), остальные линии мультиплета $M=240$ представлены в спектре, из них одна Cr I $\lambda$ 4260.19 не блендированная, остальные в блендах (сливаются)
		4219.38	0.77	3	9	6	+2.04	Сливается с Fe $\lambda$ 4219.36 ( $M=800$ ) и Fe I $\lambda$ 4219.41 ( $M=419$ ). Мультиплет $M=800$ состоит всего из одной линии. Линии мультиплета $M=419$ для Fe I представлены в спектре в блендах
		4047.95	0.21	4	10	5	+0.80	Блендируется с Cr II $\lambda$ 4048.02 ( $M=182$ ), остальные линии мультиплета $M=182$ очень слабые и находятся в блендах
Os I $z=76$	8.7	4420.477	0.00	1	12	8	+2.59	Блендируется с Zr I $\lambda$ 4420.45 ( $M=61$ ), остальные линии мультиплета $M=61$ также представлены в спектре. Линия Os I $\lambda$ 4420.47 ( $M=1$ ) имеется в спектре Солнца [18]
		4260.85	0.00	1	12	8	+2.64	Сливается с Ti I $\lambda$ 4260.74 ( $M=25$ ), VII $\lambda$ 4260.75 ( $M=18; 24$ ) и Fe I $\lambda$ 4260.73 ( $M=35$ )
		4311.40	0.64	—	10	8	+2.32	Уверенная линия. Не блендируется
Os II $z=76$	17	4399.27	2.7	—	13	8	—	Линия уверенная, лежит на левом крыле линии Ti II $\lambda$ 4399.76. Блендируется с Zr II $\lambda$ 4399.44 ( $M=67$ ) и Ce II $\lambda$ 4399.20 ( $M=81$ ). Os II $\lambda$ 4399.27 отождествлена в спектре Солнца как Fe I [19]
Hg II $z=80$		3984.04	—	—	31	6	—	Линия уверенная. Слегка блендируется с Cr I $\lambda$ 3983.91 ( $M=38$ ), остальные линии мультиплета $M=38$ не представлены в спектре (одни сливаются с блендами, другие — очень слабые и показывают только следы)

ТАБЛИЦА 1 (продолжение)

Элемент	Потенциал ионизации, эВ	$\lambda$ , Å	Потенциал возбуждения, эВ	Номер мультиплета	$W_\lambda$ , мÅ	Число спектральных $n$	$\log gf/\lambda$ [21]	Примечания
HgI $z=80$	10.43	4358.34	4.87	1	13	9	—	Лежит на правом крыле линии H <sub>γ</sub> . Блендируется слегка с FeI $\lambda$ 4358.51 ( $M=412$ )
OsI		4550.11	—	—	—	8	—	Следы
		51.30	—	—	—	8	—	»
		97.16	—	—	—	8	—	»

поэтому «чистых», неблендированных линий вообще мало. Часты случаи, когда линия блендируется, но хорошо заметна. Большое число линий искомым элементов очень слабы и поэтому говорить уверенно об их присутствии в спектре трудно. Подавляющее большинство линий тяжелых химических элементов совпадает по длине волны с другими элементами, а поскольку силы осцилляторов как для тех, так и для других часто неизвестны, то объективная оценка при отождествлении затруднена. В этом состоит одна из многих сложностей поиска линий тяжелых элементов в спектрах Ар-звезд.

Рассмотрим условия наиболее вероятных идентификаций линий тяжелых элементов в спектре «Спс».

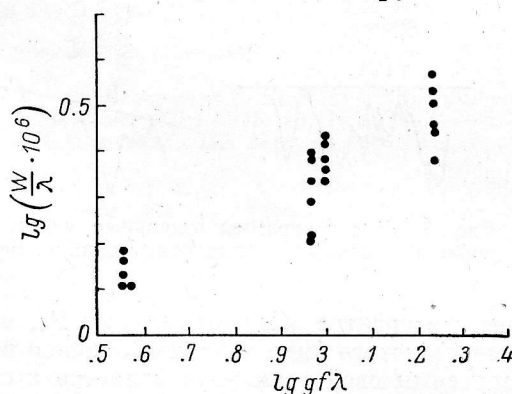


Рис. 1. Кривая роста для звезды «Спс», построенная по линиям W1.

1. Вольфрам. Уверенно отождествляются линии W1  $\lambda\lambda$  4294.62 и 4302.13 Å, на основании которых мы делаем вывод о присутствии вольфрама в атмосфере «Спс». С линией W1  $\lambda$  4294.62 Å практически совпадает ZrI  $\lambda$  4294.78 Å ( $M=45$ ), однако другие члены сорок пятого мультиплета циркония в спектре не найдены. Доводом в пользу присутствия W1 является также кривая роста, построенная нами по линиям его шестого и седьмого мультиплетов:  $\lambda\lambda$  4008.77, 4074.36, 4294.62, 4302.13 Å (рис. 1). Из рисунка видно, что кривая роста носит плавный характер и можно считать, что влияние бленд незначительно. На рис. 2 приводим часть регистрограммы, на которой указано положение линий вольфрама и ближайших бленд.

2. Осмий. Мы подозреваем наличие как OsI, так и OsII. Уверенно отождествляются только линии OsI  $\lambda$  4311.40 и OsII  $\lambda$  4399.27 Å, причем первая линия ничем не блендируется (рис. 2). Вторая линия совпадает по длине волны с CeII  $\lambda$  4399.20, однако ни одна из линий CeII того же мультиплета не была найдена в спектре. Поэтому можно считать, что осмий отождествляется уверенно.

3. Ртуть. Уверенно отождествляются две линии ртути: HgII  $\lambda$  3984.04 и HgI  $\lambda$  4358.34. Линия HgII  $\lambda$  3984.04 была найдена нами ранее [13].

**Обсуждение результатов.** Таким образом, с большой степенью достоверности мы обнаружили в атмосфере «Спс» три тяжелых элемента: вольфрам, осмий и ртуть. Это указывает на существование ядерных реакций

в настоящее время или на то, что они были в прошлом. В этих случаях следует предполагать, что элементы поставляются непрерывно или вещество не перемешивается (или перемешивается слабо) вследствие заморозки в магнитном поле. Найденные элементы, как известно, образуют характерный пик содержания тяжелых элементов с  $74 \leq z \leq 83$ , образовавшихся вследствие  $r$ -процесса. В то же время остается непонятным,

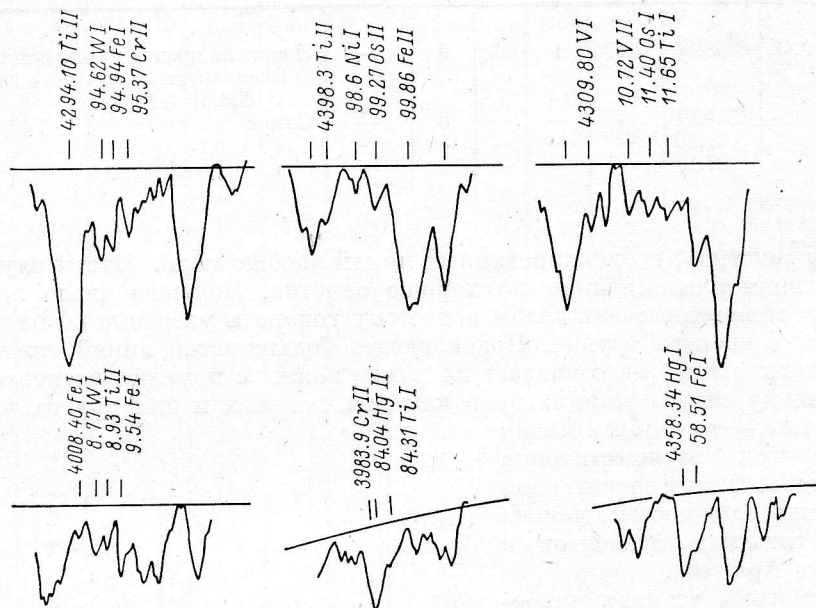


Рис. 2. Регистрограммы отдельных участков видимого спектра  $\nu$ Cnc, содержащие линии тяжелых химических элементов W I, Os I, Os II, Hg I и Hg II.

почему в спектре  $\nu$ Cnc отсутствует Pt, являющаяся также характерным элементом этого пика и наблюдавшаяся в других Ар-звездах [7]. Вторым интересным свойством  $\nu$ Cnc является отсутствие линий редкоземельных элементов, хотя они тоже должны образоваться при  $r$ -процессе. В то же время линии других элементов усилены, особенно Sr, Si, Cr, как и у многих других Ар-звезд.

ТАБЛИЦА 2

Звезда	$T_{\text{эф}}$ , °K	Тип peculiarity	Тяжелые химические элементы								Источник	
			W	Re	Os	Ir	Pt	Hg	Pb	U		Am
HD 220825	11200	Sr Cr Eu Si	+	+	+	+	+					[3] Данное исследование
HD 77350 ( $\nu$ Cnc)	11600	Si Cr Sr	+		+				+			
HD 18296 (21Per)	11700	Sr Cr Fu Si	+		+				+			[22] [23]
HD 143807 (iCrB)	11700	Mn Hg							+			

В табл. 2 приведены данные о наличии тяжелых химических элементов в атмосферах Ар-звезд, имеющих близкую с  $\nu$ Cnc эффективную температуру  $T_{\text{эф}}$ .

Из таблицы видно, что набор тяжелых элементов у звезд различен и это свидетельствует о крайне неодинаковых условиях их образования. Основные физические параметры этих звезд (эффективные температуры,

давление, строение атмосфер и др.), как показали исследования, не могут резко отличаться. Значительное различие наблюдается у них, как правило, в напряженности и структуре магнитного поля, а также в распределении элементов по поверхности звезды и степени их концентрации. Вероятно, эти свойства, а также набор тяжелых элементов у пекулярных звезд связаны с каким-то общим механизмом их образования. Одним из таких механизмов может быть ядерный синтез [24], проходящий в активных областях звезд. Набор элементов в таком случае будет зависеть от энергии ускорения частиц, их плотности, длительности процесса, а также плотности и химического состава слоев, в которых происходит синтез элементов. Последнее время многие исследователи указывают на существование кратковременных изменений блеска и профилей (формы) водородных линий бальмеровской серии у ряда Ap-звезд, свидетельствующих о наличии нестационарных явлений в их атмосферах. Определенное число Ap-звезд являются спектроскопическими двойными, вследствие чего приливные течения в их атмосферах несомненны (у ряда Ap-звезд подозреваются также наличие короткоживущих элементов). Таким образом, имеющиеся данные указывают на то, что атмосферы пекулярных звезд не могут быть совершенно стабильными, и поэтому набор элементов, сконцентрированных в «пятнах», и размеры «пятен» необходимо постоянно поддерживать.

#### Список литературы

1. Jashek M., Brandy E. Transuranium elements in HD 2534. — *Astron Astrophys.*, 1972, 20, N 2, p. 233—235.
2. Guthrie B. N. G. The Os—Pt—Hg abundance peak in Ap-stars and the problem of very heavy cosmic rays. — *Astrophys. Space Sci.*, 1972, 15, N 2, p. 214—228.
3. Galeotti P. Evidence for *r*-process elements in HR 8911. — *Astrophys. Space Sci.*, 1974, 31, N 1, p. 193—201.
4. Cowley C. R., Hartoog M. R., Aller M. F., Cowley A. P. Abundances of trace elements in HR 465: Evidence for the *r*-process. — *Astrophys. J.*, 1973, 183, N 1, p. 127—131.
5. Hartoog M. R., Cowley C. R., Cowley A. P. The application of wavelength coincidence statistics to line identification: HR 465 and HR 7575. — *Astrophys. J.*, 1973, 182, N 3, p. 847—858.
6. Adelman S. I. Line identifications, elemental abundances and equivalent widths for 21 sharp-lined cool peculiar A stars and two comparison standards. — *Astrophys. J. Suppl.*, 1973, 26, N 226, p. 1—18.
7. Cowley C. R., Hartoog M. R., Cowley A. P. Element identifications in five Ap-stars. — *Astrophys. J.*, 1974, 194, N 2, p. 343—354.
8. Guthrie B. N. G. Yttrium and mercury in Mn-type peculiar A stars. — *Astrophys. Space Sci.*, 1974, 10, N 1, p. 156—164.
9. White R. E., Vaughan A. H., Preston J. G. W., Swings I. P. — Isotopic abundances of Hg in mercury stars inferred from HgII  $\lambda$  3984. — *Astrophys. J.*, 1976, 204, N 1, p. 131—140.
10. Cowley C. R., Aikman G. C. A study of the 3984 feature in the mercury-manganese stars. — *Publ. Astron. Soc. Pacific*, 1975, 87, N 518, p. 513—521.
11. Кухович Б. Пекулярные Ap-звезды: адекватный способ проверки *r*-процессов. — VI Ленинградский международный семинар, 1974, с. 297—308.
12. Babcock H. W. A. Catalog of magnetic stars. — *Astrophys. J.*, 1958, 3, Suppl. N 30, p. 149—210.
13. Козлова К. И., Глаголевский Ю. В., Клочкова В. Ф. Предварительные результаты спектрофотометрического исследования магнитной Ap-звезды  $\gamma$  Сnc. — *Магнитные Ap-звезды*. Баку, «ЭЛМ», 1974, с. 75—80.
14. Burke E. W., Rolland W. W., Boy W. R. A photoelectric study of magnetic variable stars. — *J. R. Astron. Soc. Can.*, 1970, 64, N 6, p. 353—364.
15. Moore C. E., Minnaert M. G. J., Neutgast J. Solar spectrum 2935 Å to 8770 Å. Washington, 1966. 100 p. (Nat. Bureau of Standards, Monograph, 61).
16. Moore C. E. A multiplet table of astrophysical interest. — *Contr. Princeton Univ. Obs.*, 1945, N 20, p. 1—110.
17. Зайдель А. Н., Прокофьев В. К., Райский С. М., Славный В. А., Шрейдер Е. Л. Таблицы спектральных линий. М., «Наука», 1969. 782 с.
18. Wehrse R. A list of all Fraunhofer lines of the Rowland tables arranged by elements. Heidelberg, 1974, p. 2—105.
19. Pierce A. K., Breckinridge I. B. The Kitt Peak table of photographic solar spectrum wavelengths. — *Kitt Peak Nat. Obs. Contr.*, 1974, N 559, p. 1—43.

20. Глаголевский Ю. В., Козлова К. И., Полосухина Н. С. Спектрофотометрическое исследование магнитнопеременной звезды 21 Per. 1. — *Астрофизика*, 1974, 10, вып. 4, с. 517—533.
  21. Корлисс Ч., Бозман У. Вероятности переходов и силы осцилляторов 70 элементов. М., «Мир», 1968. 562 с.
  22. Глаголевский Ю. В., Козлова К. И., Чунакова Н. М. Об эффективных температурах peculiarных металлических звезд. — *Астрофиз. исслед.* (Изв. САО), 1973, 5, с. 52—69.
  23. Bidelman W. P. Line identifications in peculiar stars. — *Abundance Determination in stellar Spectra*, I. A. U., Symposium 1966, N 26, p. 229—234.
  24. Пикельнер С. Б., Хохлова В. Л. Магнитные звезды. — *Усп. физ. наук*, 1972, 107, вып. 3, с. 389—404.
-