

УДК 524.3-36

**В. Ф. Гопка¹, А. В. Ющенко², В. А. Ющенко¹,
И. В. Панов³, Чулхи Ким⁴**

¹Научно-исследовательский институт «Астрономическая обсерватория»
Одесского национального университета имени И. И. Мечникова
65014 Одесса, парк Шевченко

²Университет Сейджон
143-747 Южная Корея, Сеул

³Институт теоретической и экспериментальной физики
117259 Россия, Москва, ул. Черемушкинская 25

⁴Национальный университет Чонбук
561-756 Южная Корея, Чонджу

Об идентификации линий поглощения актиноидов с коротким периодом полураспада в спектре звезды Пшибыльского (HD 101065)

Для одной из наиболее пекулярных звезд главной последовательности HD 101065 (звезда Пшибыльского) выполнено отождествление линий поглощения актиноидов в ее спектре: актиния ($Z = 89$), протактиния (91), нептуния (93), плутония (94), америция (95), кюрия (96), берклия (97), калифорния (98), эйнштейния (99). Использовался спектр, полученный на 8.2-м телескопе ESO со спектральным разрешением 80000.

ПРО ІДЕНТИФІКАЦІЮ ЛІНІЙ ПОГЛІНАННЯ АКТИНОЇДІВ З КОРОТКИМ ПЕРІОДОМ НАПІВРОЗПАДУ У СПЕКТРІ ЗІРКИ ПШИБИЛЬСЬКОГО (HD 101065), Гопка В. Ф., Ющенко А. В., Ющенко В. А., Панов І. В., Чулхі Кім. — Для однієї з найбільш пекулярних зірок головної послідовності HD 101065 (зірка Пшибильського) ототожені лінії актиноїдів в її спектрі: актинію ($Z = 89$), протактинію (91), нептунію (93), плутонію (94), америцію (95), кюрію (96), берклію (97), каліфорнію (98), ейнштейнію (99). Використовувались спектри, отримані на 8.2-м телескопі ESO зі спектральним розділенням 80000.

THE IDENTIFICATION OF ABSORPTION LINES OF ACTINIDES IN THE SPECTRUM OF PRZYBYLSKI'S STAR (HD 101065), by Gopka V. F., Yushchenko A. V., Yushchenko V. A., Panov I. V., Chulhee Kim. — The unusual main-sequence star HD 101065 (Przybylski's star) were analyzed to identify the lines of actinides in its spectrum: actinium ($Z = 89$), protactinium (91), neptunium (93), plutonium (94), americium (95), curium (96), berkelium (97), californium (98), and einsteinium (99). The high-resolution spectra ($R = 80.000$) obtained at the 8.2-m ESO telescope were used.

ИСТОРИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ЗВЕЗДЫ ПШИБЫЛЬСКОГО

В 1961 г. Пшибыльским [16] было обнаружено, что звезда HD 101065 (V816 Cen) восьмой звездной величины уникальна по ряду свойств; впоследствии ей было присвоено имя первооткрывателя. Результаты первых фотометрических исследований звезды Пшибыльского (далее ЗП) показывали, что ее эффективная температура выше, чем температура Солнца, а покровный эффект аномально большой. Были обнаружены линии Ba II, Ca II, Ce II, La II, Nd II, Pr II [20]. Линии нейтрального гольмия Ho I, не представленные в спектре Солнца в видимом диапазоне, уверенно идентифицировались в спектре ЗП даже по спектрам с малой дисперсией [17]. Необычность химического состава этой звезды состоит в том, что при температуре, почти равной температуре Прочиона А (химический состав атмосферы Прочиона близок к солнечному [4]), в атмосфере ЗП проявляются аномалии химического состава, свойственные более горячим Ар-звездам. Аномалия проявляется и в том, что в спектре ЗП доминирует группа линий лантаноидов, в то время как в спектрах нормальных звезд близкой температуры преобладают линии поглощения нейтральных элементов группы железа. Но самым необычным фактом является наличие множества сильных линий поглощения, которые не поддаются идентификации. Во многих участках спектра количество неотожествленных спектральных линий превышает количество известных.

В 1974 г. Вагнером и Петфордом [25] по спектрам с обратной дисперсией 1 нм/мм в спектре ЗП были обнаружены спектральные линии пятидесяти одного химического элемента, в том числе прометия. В 2000 г. Каули и др. [10] нашли содержание пятидесяти четырех элементов в атмосфере звезды, при этом содержание лантаноидов оказалось избыточным на три-четыре порядка. Содержание и изотопный состав лития определены А. В. Шавриной и др. [3, 23, 24] по резонансной линии лития λ 670.78 нм, блендированной линиями лантаноидов. Вопрос идентификации линий двух радиоактивных элементов технеция и прометия неоднократно обсуждался в работах Каули и др. [5, 8]. В отличие от лантаноидов (атомные номера $Z = 57...71$), линии которых доминируют в спектре, элементы группы железа представлены меньшим количеством линий. Наличие линий поглощения железа некоторое время оспаривалось [19], затем было показано, что содержание железа в атмосфере этой звезды на порядок ниже содержания железа в атмосфере Солнца [10].

Подключение к анализу новых атомных данных показало, что среди вновь идентифицируемых линий преобладают линии поглощения ионизованного церия [12, 24, 28]. Тем не менее, на многих участках спектра практически нет согласия синтетического и реального спектров.

Следует отметить, что интенсивность и количество неотожествленных линий в спектре ЗП уникальны. Большое количество неизвестных линий сравнимой, но меньшей интенсивности наблюдается в спектрах еще нескольких Ар-звезд. Проблема идентификации большого количества умеренно сильных и слабых неизвестных линий давно стоит для многих Ар-звезд. Физический процесс, порождающий эти линии, не объяснен до настоящего времени. Этот процесс не принимают во внимание при анализе большинства звезд этого класса. Таким образом, дополнительное отождествление неизвестных линий в спектре ЗП позволило бы более полно интерпретировать физические условия в атмосферах химически пекулярных звезд.

**НЕИЗВЕСТНЫЕ ЛИНИИ —
ЛИНИИ ТЯЖЕЛЫХ РАДИОАКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ($Z > 83$)?**

Столь необычный спектр звезды дал повод Пшибыльскому высказать в 1975 г. гипотезу, сформулированную в названии одной из его работ: «Можно ли пекулярность HD 101065 объяснить распадом трансурановых элементов?» [18]. В то время ввиду недостаточности экспериментальных данных эта гипотеза не была подтверждена. Казалось, что новые атомные данные помогут идентифицировать спектр звезды. Однако последующие три десятилетия не внесли ясности, хотя для всех стабильных элементов появились достаточно подробные экспериментальные данные, позволяющие с высокой степенью достоверности рассчитывать теоретические спектры звездных атмосфер в видимом диапазоне. Любые попытки варьирования химического состава стабильных элементов, учета молекулярных линий, магнитного поля и других возможных эффектов не приводили к значительному изменению общего вида синтетического спектра звезды. Некоторые его участки по-прежнему остаются далекими от наблюдаемого спектра.

Естественно предположить, что неотожествленные линии следует искать среди малоизученных спектров нестабильных элементов. К сожалению, очевидные трудности работы с радиоактивными элементами и невостребованность данных об их спектрах привела к тому, что область спектроскопии радиоактивных элементов разработана плохо. Например, для относительно хорошо исследованного однократно ионизованного калифорния известны лишь длины волн 22 спектральных линий [22]. Практически во всех таблицах спектральных линий нет данных о технеции, прометии и элементах с атомными номерами $Z > 83$, за исключением тория и урана. Наиболее полные данные о спектральных линиях актиноидов [22] не содержат информации о силах осцилляторов. Для некоторых линий, например для линий эйнштейния ($Z = 99$), не приводится даже степень ионизации.

Отметим, что в спектре ЗП уверенно обнаруживаются многочисленные линии поглощения долгоживущих тория и урана ($Z = 90$ и 92) с неоднократно исследованными экспериментальными силами осцилляторов. Это позволило определить содержание этих элементов [10, 12, 27].

Анализ трансовисмутовых элементов, кроме тория и урана, выполнялся только трижды. В 1972 г. Яшек и Бранди [15] идентифицировали в спектре α -звезды HD 25354 линии поглощения америция и кюрия. В работе В. Ф. Гопки и др. [13] выполнено отождествление линий тяжелых радиоактивных элементов ($Z > 83$). Обсужден дефицит содержания свинца и висмута по отношению к другим элементам в этой области атомных номеров и возможный вклад продуктов полураспада радиоактивных элементов со временем в содержание свинца и висмута (свинец и висмут — конечные продукты полураспада радиоактивных элементов с атомными номерами больше 83). В работе Байдельмана [7] представлен список радиоактивных элементов, линии которых наблюдаются в спектре ЗП. В обоих независимых исследованиях [7, 13] подтверждено отсутствие линий астата и франция. Линии астата не попадают в диапазон длин волн наблюдений звезды, а франций — самый активный из подгруппы щелочных металлов (период полураспада самого долгоживущего изотопа 20 мин [2]), что не позволяет исследовать детальным образом его свойства в лабораториях. По-видимому, это и могло быть причиной того, что линии франция не наблюдаются.

В работе [11] нами рассмотрены также линии радиоактивных элемен-

тов, которые могли бы наблюдаться в спектрах звезд HD 965 и HR 465. Спектры этих звезд существенным образом отличаются от спектра ЗП, а количество в них возможных линий радиоактивных элементов значительно меньше. В работе [26] исследовано содержание технеция в атмосфере ЗП. В работе [21] показано, что значительная часть сильных линий, не отождествленных в спектре ЗП, принадлежит линиям Nd III, как и в спектре звезды HD 144897. Часть линий Nd III с известными значениями gf мы учитывали при расчете синтетического спектра ЗП. Идентификация сильных линий дважды ионизованного неодима в спектре ЗП (которые обычно появляются в спектрах звезд значительно более высоких температур) вовсе не исключает линий поглощения радиоактивных элементов, а скорее подтверждает необычность физических условий в атмосфере звезды с эффективной температурой $T_{\text{эф}} = 6600$ К. К настоящему времени появились новые данные по спектроскопии актиноидов [22]. Цель данной работы — исследование линий актиноидов в спектре ЗП.

НАБЛЮДАЕМЫЕ И СИНТЕТИЧЕСКИЙ СПЕКТРЫ ЗВЕЗДЫ ПШИБЫЛЬСКОГО

Исследуемый спектр звезды был получен в 2002 г. на телескопе VLT [<http://www.sc.eso.org/santiago/uvespop/index.html>]. Спектральное разрешение составляет 80000 в диапазоне длин волн $\lambda\lambda = 304...1040$ нм, отношение сигнала к шуму — более 300 (спектрограф UVES). При построении синтетического спектра применялась модель атмосферы звезды Пшибыльского ($T_{\text{эф}} = 6600$ К, $\lg g = 4.2$), которая использовалась А. В. Шавриной и др. [23, 24]. Было принято значение микротурбулентной скорости $\xi_{\text{micro}} = 2.0$ км/с, магнитное и другие типы уширений спектральных линий моделировались профилем вращения $v \sin i = 3.5 \pm 0.5$ км/с. При расчетах синтетического спектра использовались содержания стабильных химических элементов из работы Каули и др. [10]. Более подробно выбор и анализ моделей атмосферы ЗП изложен в работах [23, 24], методика расчета синтетического спектра и списки используемых атомных и молекулярных линий описаны в работах [1, 4, 12, 28]. Для расчетов применялись программы Куруца из пакета SYNTHE.

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ЛИНИЙ ПОГЛОЩЕНИЯ РАДИОАКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В СПЕКТРЕ ЗВЕЗДЫ ПШИБЫЛЬСКОГО

Применяемая нами методика идентификации линий включает расчет теоретического спектра и сравнение его с реальным спектром звезды. Используемые списки спектральных линий атомов и молекул [1, 4, 12, 14] — это наиболее полная компиляция атомных данных, апробированная на реальных спектрах нормальных и пекулярных звезд. С появлением новых списков [22] мы проводим новую работу по идентификации актиноидов. Они не учитывались в расчетах синтетического спектра, поскольку силы осцилляторов для спектральных линий актиноидов, за исключением урана, тория и нескольких линий америция, не определялись.

Вполне естественно предположить, что в звезде, перенасыщенной лантаноидами, могут быть и актиноиды. Структура внутренних электронных оболочек атомов двух групп семейства редкоземельных элементов, лантаноидов и актиноидов, аналогична: от церия (один 4f-электрон) до гадолиния

Таблица 1. Основные сведения о радиоактивных элементах ($Z > 89$)

Z	Id.	Название	N	Времена полураспада наиболее долгоживущих изотопов в годах (y), сутках (d), часах (h) и минутах (m)
89	Ac	Актиний	36	^{227}Ac 21.77 y, ^{225}Ac 10.0 d, ^{226}Ac 29.37 h, ^{228}Ac 6.15 h
90	Th	Торий	30	^{232}Th $1.4 \cdot 10^{10}$ y, ^{230}Th $7.538 \cdot 10^4$ y, ^{229}Th 7340 y, ^{228}Th 1.916 y
91	Pa	Протактиний	31	^{231}Pa 32760 y, ^{233}Pa 26.967 d, ^{230}Pa 17.4 d, ^{229}Pa 1.50 d
92	U	Уран	28	^{238}U $4.47 \cdot 10^9$ y, ^{235}U $7.038 \cdot 10^8$ y, ^{236}U $2.34 \cdot 10^7$ y, ^{234}U $2.45 \cdot 10^5$ y
93	Np	Нептуний	25	^{237}Np $2.14 \cdot 10^6$ y, ^{236}Np $1.54 \cdot 10^5$ y, ^{235}Np 396.1 d, ^{234}Np 4.4 d
94	Pu	Плутоний	35	^{244}Pu $8.08 \cdot 10^7$ y, ^{242}Pu $3.733 \cdot 10^5$ y, ^{239}Pu 24110 y, ^{240}Pu 6563 y
95	Am	Америций	30	^{243}Am 7370 y, ^{241}Am 432.2 y, ^{240}Am 50.8 h, ^{242}Am 16.02 h
96	Cm	Кюрий	26	^{247}Cm $1.56 \cdot 10^7$ y, ^{248}Cm $3.40 \cdot 10^5$ y, ^{250}Cm 9000 y, ^{245}Cm 8500 y
97	Bk	Берклий	25	^{247}Bk 1380 y, ^{248}Bk 9 y, ^{247}Bk 1380 y, ^{249}Bk 320 d
98	Cf	Калифорний	21	^{251}Cf 898 y, ^{249}Cf 351 y, ^{250}Cf 13.08 y, ^{252}Cf 2.645 y
99	Es	Эйнштейний	21	^{252}Es 471.7 d, ^{254}Es 275.7 d, ^{253}Es 20.47 d, ^{255}Es 39.8 d

(семь 4f-электронов) для лантаноидов, и от тория (один 5f-электрон) до кюрия (семь 5f-электронов) у актиноидов. У самых тяжелых элементов заполняется внутренняя оболочка 5f, причем в группе актиноидов структура электронных оболочек элементов с атомными номерами $Z = 96$ и 97 различается сразу на два внутренних электрона 5f, что аналогично изменению структуры атомов тербия и диспрозия ($Z = 65$ и 66) в оболочке 4f [2]. Химические и физические свойства лантаноидов и актиноидов, обуславливаемые свойствами электронной оболочки, имеют много общего.

Подобие значений избытков содержаний всего семейства лантаноидов (3.5—4 dex) в атмосфере ЗП позволяет предположить, что актиноиды с большими периодами полураспада, а именно изотопы урана и тория, имеют аналогичные содержания. Как отмечалось выше, периоды их полураспада настолько велики, что не оказывают существенного влияния на физические и химические свойства вещества. Каули и др. [10] оценили содержания тория (по 12 линиям в диапазоне длин волн $\lambda\lambda = 457.5...573.2$ нм) и урана (по 9 линиям, $\lambda\lambda = 385.9...453.8$ нм) в атмосфере ЗП равными 2.50—3.01 и 2.40 (в шкале $\lg N(\text{H}) = 12$) соответственно, что примерно на три порядка больше содержания этих элементов в атмосфере Солнца. Приведенные цифры избытков содержаний лантаноидов, урана и тория были получены без учета стратификации этих элементов в атмосфере звезды. С учетом стратификации было определено содержание бария, тория и урана, а также исследовано содержание технеция в атмосфере ЗП [26, 27].

Так как нами исследуются малоизученные изотопы, в табл. 1 приведены основные сведения о временах полураспада четырех наиболее долгоживущих изотопов актиноидов [<http://ie.lbl.gov/education/isotopes.htm>] (здесь N — количество известных изотопов).

Идентификация выполнялась для тех линий наблюдаемого спектра, которые не были найдены в теоретическом спектре, рассчитанном с учетом только стабильных атомов и молекул. Отождествление осуществлялось только по длинам волн центров линий, поэтому не исключено, что место этих линий могут впоследствии занять линии других элементов (по мере

Таблица 2. Идентификация линий поглощения актиноидов в спектре звезды Пшибыльского

Ион	$\lambda_{\text{лаб}}, \text{нм}$ [22]	$\lambda_{\text{наб}}, \text{нм}$	$W, \text{нм}$	$\lambda, \text{нм}$ [13]
Ac I				388.5560
Ac I	419.4400	419.4390	7.2	419.4400
Ac II	304.3300	304.3298	2.5	304.3300
Ac II	308.6040	308.6048		
Ac II			5.0	315.4410
Ac II	348.9530	348.9543		
Ac II	353.4630	353.4621	2.3	
Ac II	375.6670	375.6671		
Ac II			7.0	419.4400
Ac II	575.8970	575.8964	2.2	575.8970
Ac II	591.0850	591.0861	2.4	591.0850
Ac III	456.9870	456.9866	7.2	
Pa I				616.2560
Pa I	694.5720	694.5748	5.5:	694.5720
Pa I	787.2950	787.2950	2.3	787.2950
Pa II	314.6280	314.6291	3.0	
Pa II	317.0890	317.0870	3.6:	317.0890
Pa II	334.6660	334.6658	4.0	
Pa II	401.2960	401.2964	3.8:	401.2960
Np I	565.2750	565.2747		
Np I	601.1220	601.1213		
Np I	691.2910	691.2920		
Np I	697.2090	697.2081	2.7	697.2090
Np I	773.5140	773.5125	0.7	773.5140
Np I	816.7420	816.7401	1.4	
Np I	818.8610	818.8610	0.26	
Np I	852.9960	852.9948		852.9960
Np I	914.1300	914.1297	4.1	914.1300
Pu I	325.2070	325.2064	4.7	325.2070
Pu I	332.0607	332.0593	4.0	332.0607
Pu I	336.5208	336.5220	3.5	
Pu I	379.2220	379.2220		379.2220
Pu I	409.7113	409.7119		
Pu I	610.1958	610.1959	≈ 5.0	
Pu I	660.8947	660.8957	0.45	660.8947
Pu I	872.9818	872.9818	0.65	
Pu II	310.4117	310.4125	3.7	
Pu II	318.5123	318.5127	2.0	
Pu II	319.1487	319.1490	5.5	
Pu II	320.6809	320.6814	3.5	
Pu II	321.6146	321.6140	2.0	
Pu II	322.0942	322.0936	3.7:	322.0942
Pu II	329.8423	329.8412	1.6	
Pu II	381.2301	381.2289		
Am I	339.5010	339.5015	< 5.0	
Am I	344.6190	344.6194	6.6	344.6186
Am I	351.0130	351.0130		351.0127
Am I	356.9160	356.9197	4.8	356.9163
Am I				402.0252
Am I	426.5550	426.5561	2.0	426.5550
Am I	465.3450	465.3449		
Am I	500.0210	500.0220	9.7	500.0210
Am I				559.8130
Am I	640.5110	640.5109	0.9	640.5110
Am II	377.7500	377.7493	7.5	377.7504
Am II	408.9320	408.9321	5.1	408.9291
Am II	432.4570	432.4574	6.8	432.4570
Am II	502.0960	502.0944	3.4	502.0960
Cm I	310.9690	310.9713		
Cm I	311.6410	311.6420	3.2:	311.6411
Cm I	314.7330	314.7333	2.0:	314.7325
Cm I	345.2920	345.2951		345.2922
Cm I	366.4340	366.4335		
Cm I				426.6450
Cm I				460.8400

Окончание табл. 2

Ион	$\lambda_{\text{лаб}}, \text{нм}$ [22]	$\lambda_{\text{наб}}, \text{нм}$	$W, \text{нм}$	$\lambda, \text{нм}$ [13]
Cm I			1.4	605.8900
Cm I			8.8	624.3350
Cm I			0.4	664.0170
Cm I				772.0470
Cm II	323.8550	323.8572		
Cm II	325.2680	325.2672		325.2675
Cm II	329.6710	329.6693		329.6708
Bk	361.1930	361.1928		
Bk I	355.3600	355.3613		
Bk I	362.7610	362.7612		362.7607
Bk I	367.5590	362.7580		
Bk I	374.3050	374.3066	6.3	374.3047
Bk I			7.3	374.5403
Bk I			0.5	380.2470
Bk I				384.7626
Bk I			2.5	388.0106
Bk I				442.3011
Bk I			2.4	565.6540
Bk I			3.8	704.0850
Bk II	341.2130	341.2145	0.33	341.2131
Bk II	356.7250	356.7242	4.5	
Bk II			3.9	414.7134
Bk II				739.4260
Bk II			0.6	986.2390
Cf I	361.7488	361.7496		
Cf I	365.9458	365.9474		365.9460
Cf I	433.5223	433.5232	5.0:	433.5220
Cf I				540.8890
Cf I	707.4410	707.4422	3.9	
Cf I	730.7867	730.7868		
Cf II			6.7	369.9490
Cf II	378.9041	378.9045		
Cf II	399.3556	399.3539		
Es	341.3170	341.3167	2.7	
Es	357.5680	357.5691	3.5	357.5680
Es	359.5470	359.5487	5.5	359.5470
Es	372.2320	372.2323		
Es	379.2990	379.3008	3.2	379.2990
Es				480.2210
Es I				349.8110
Es II	360.675	360.6741	6.8	360.6750

пополнения базы атомных данных), и идентифицированные нами линии окажутся блендами.

Результаты идентификации приводятся в табл. 2, где $\lambda_{\text{лаб}}$ — лабораторные длины волн линий актиноидов согласно работе [22], $\lambda_{\text{наб}}$ — длины волн линий в наблюдаемом спектре, W — эквивалентные ширины, λ — соответствующие оценки из работы [13]. На рис. 1—5 показаны примеры отождествлений линий актиноидов в спектре ЗП. Так как идентификация выполнялась только по длинам волн без учета величин gf , то более точно можно говорить о возможном вкладе идентифицированных линий актиноидов в реальные линии спектра ЗП.

Совпадение большого количества длин волн центров линий радиоактивных элементов и линий в наблюдаемом спектре ЗП — это факт, которым нельзя пренебрегать. Этот важный момент может стать решающим фактором для построения теории, описывающей ЗП. В целом нами подтверждены

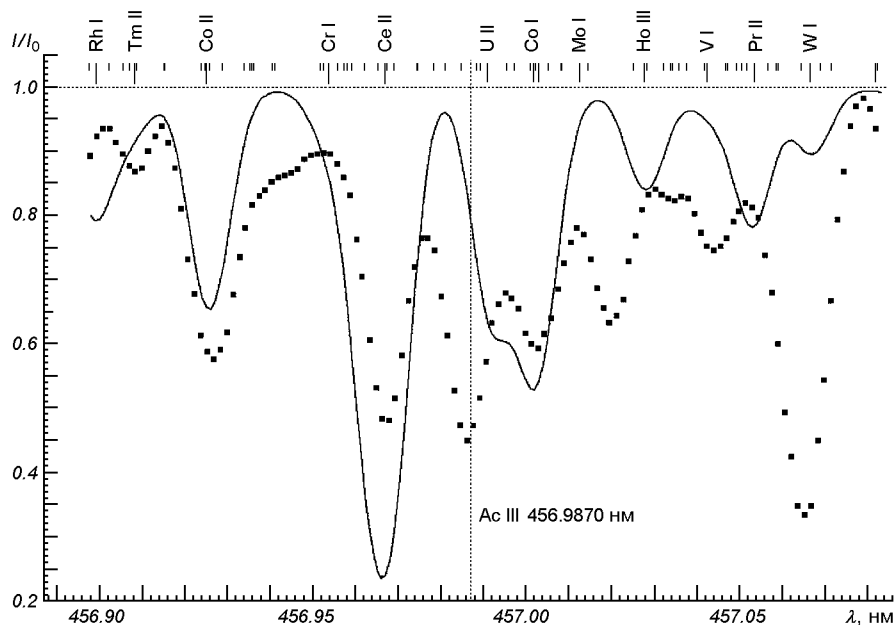


Рис. 1. Линия Ac III λ 456.9870 нм в спектре звезды Пшибыльского: квадратики -- наблюдения на VLT, сплошная линия -- синтетический спектр (свертка с инструментальным профилем и профилем вращения)

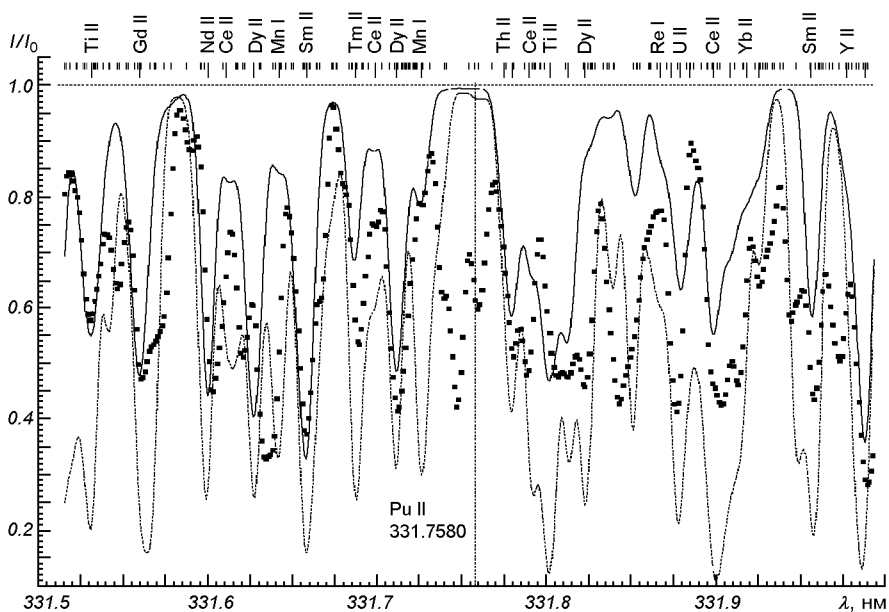


Рис. 2. То же для линии Pu II λ 773.5140 нм. Пунктирная линия -- синтетический спектр с учетом стратификации элементов [27]

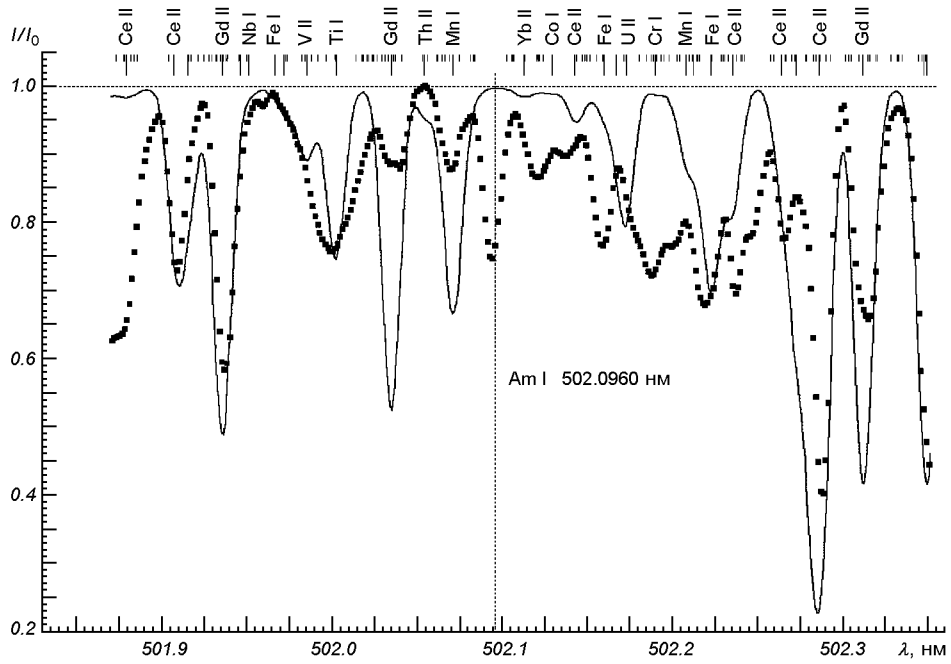


Рис. 3. То же для линии Am I λ 502.0960 нм

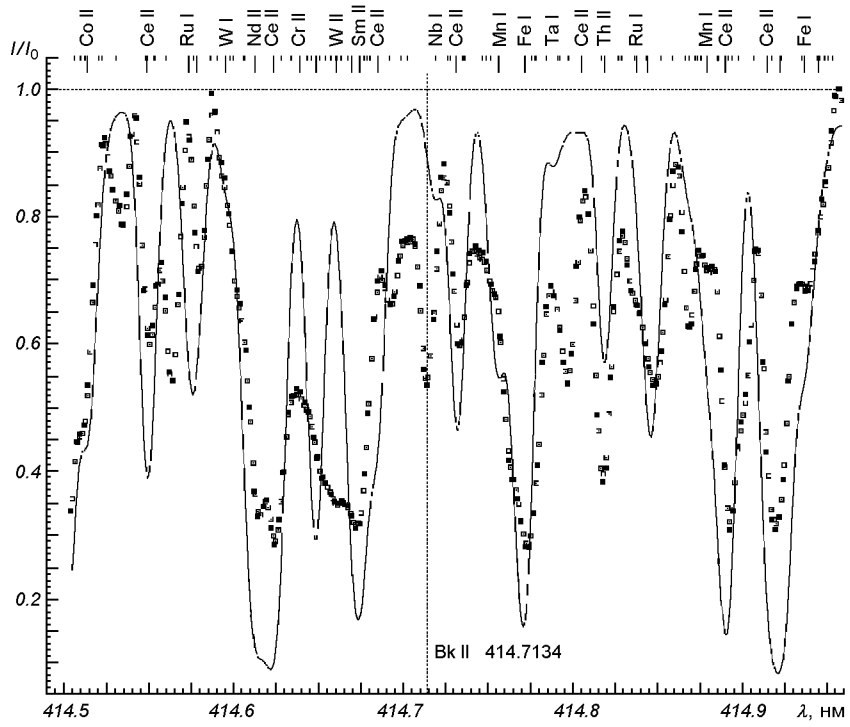


Рис. 4. То же для линии Bk II λ 414.7134 нм

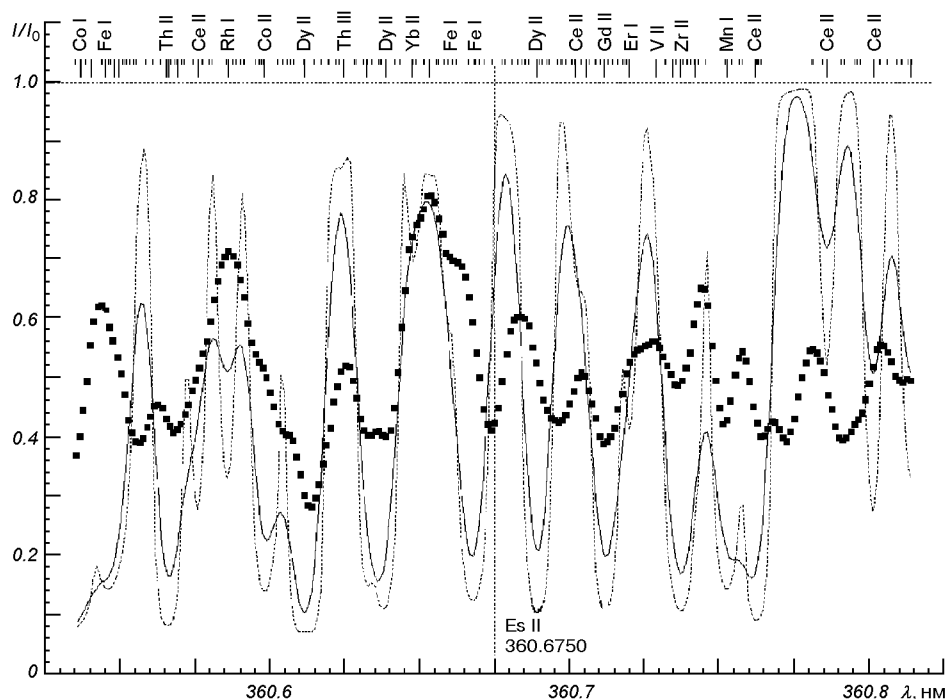


Рис. 5. То же для линии Es II λ 361.7580 нм. Пунктирная линия — синтетический спектр без свертки

результаты идентификации линий, выполненной ранее. Идентифицированы линии актиния, протактиния, нептуния, плутония, америция, кюрия, берклия, калифорния, эйнштейния. Стоит отметить хорошее совпадение лабораторных длин волн линий для америция и берклия с длинами волн линий поглощения в наблюдаемом спектре ЗП, и сравнительно большой список линий плутония по сравнению с предыдущим исследованием [13].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Продолжено исследование линий актиноидов в спектре уникальной го-Ар звезды под номером HD 101065 с использованием новейших атомных данных. Мы можем констатировать, что совпадение длин волн линий, не идентифицированных ранее в наблюдаемом спектре, и длин волн лабораторных линий радиоактивных элементов не отличается от аналогичных совпадений по длинам волн для стабильных элементов. В некоторых случаях различие длин волн составляет лишь несколько единиц в последнем знаке. Это свидетельствует о прекрасном совпадении длин волн актиноидов с короткими периодами полураспада и линий, не идентифицированных ранее в спектре ЗП. Исследование линий этих элементов ранее проводилось только для одной звезды HD 25354 [15], в спектре которой были также отождествлены линии америция и кюрия.

Были идентифицированы линии, не описывающиеся теоретическим спектром, учитывающем все доступные списки спектральных линий стабильных атомов и молекул. Списки линий актиноидов, совпадающие с

линиями в спектре ЗП, больше, чем те, что даны в табл. 2. Остальные линии совпадают по длинам волн с линиями других стабильных элементов, возможно, они входят в бленды. Идентификация линий Ac III, Nd III и линий других дважды ионизованных лантаноидов в спектре ЗП свидетельствует об особых условиях, которые имеют место в атмосфере ЗП с эффективной температурой всего $T_{\text{эф}} = 6600$ К.

Идентификация линий актиноидов и определение их эквивалентных ширин значительно расширяет наблюдательную базу данных, необходимых для понимания физики нуклеосинтеза трансурановых элементов.

Авторы благодарят администрации баз атомных данных ADS, VALD, DREAM, NIST, UVES Paranal Observatory Project (ESO DDT Program ID 266.D-5655). Чулхи Ким и В. Гопка были поддержаны исследовательским фондом Национального университета Чонгбук (Южная Корея), А. Ющенко был поддержан Астрофизическим центром изучения структуры и эволюции космоса в университете Сейджон (Южная Корея), И. Панов — Национальным научным фондом Швейцарии (грант IB7320-110996).

1. Гопка В. Ф., Ющенко А. В., Мишенина Т. В. и др. Анализ химического состава атмосферы звезды гало HD 221170 методом синтетического спектра // Астрон. журн.—2004.—81, № 7.—С. 635—647.
2. Радциг А. А., Смирнов Б. М. Параметры атомов и ионов. — М.: Атомиздат, 1986.—75 с.
3. Шаврина А. В., Полосухина Н. С., Павленко Я. В. и др. Особенности спектра уникальной гоАр звезды HD 101065 в области резонансного дублета лития 6708 А // Астрон. журн.—2003.—80, № 7.—С. 624—630.
4. Ющенко А. В., Гопка В. Ф. О содержании тяжелых элементов в атмосфере Проциона // Письма в Астрон. журн.—1996.—22, № 5—6.—С. 460—470.
5. Aller M., Cowley C. R. The possible identification of promethium in HR 465 // Astrophys. J.—1970.—162, N 3.—P. 145—148.
6. Arndt Th., Back H., Steinhof A., et al. Radiative lifetimes of Am I atomic levels // Phys. Rev. A.—1988.—38, N 10.—P. 5084—5091.
7. Bidelman W. P. Tc and other unstable elements in Przybylski's star // ASP Conf. Ser.—2005.—336.—P. 309—311.
8. Cowley C. R., Bidelman W. P., Hurbig S., et al. On the possible presence of promethium in the spectra of HD 101065 (Przybylski's star) and HD 965 // Astron. and Astrophys.—2004.—419, N 3—P. 1087—1093.
9. Cowley C. R., Mathys G. Line identification and preliminary abundances from the red spectrum of HD 101065 (Przybylski's star) // Astron. and Astrophys.—1998.—339, N 1.—P. 165—169.
10. Cowley C. R., Ryabchikova T., Kupka F., et al. Abundances in Przybylski's star // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.—2000.—317, N 1.—P. 299—309.
11. Gopka V., Yushchenko A., Goriely S., et al. Radioactive elements in stellar atmospheres // AIP Conf. Proc.—2006.—847.—P. 389—391.—(Inter. Symp. on origin of matter and evolution of galaxies 2005: New horizon of nuclear astrophysics and cosmology; Tokio, Japan, 8—11 November).
12. Gopka V., Yushchenko A., Musaev F., et al. Stellar abundance patterns. What is the possible level of completeness today? // IAU 210: Modelling of stellar atmospheres / Ed.s N. Piskunov, W. W. Weiss, D. F. Gray. — Uppsala, 2003.—210.—P. A5.
13. Gopka V., Yushchenko A., Shavrina A., et al. On the radioactive shells in peculiar main sequence stars: the phenomenon of Przybylski's star // The A-Star Puzzle: IAU Symp. — Poprad, Slovakia, 2004.—224.—P. 119—127.
14. Gopka V., Yushchenko V., Shavrina A., et al. Detailed chemical abundances of several CP-stars of the upper main sequences // Kinematics and Physics of Celestial Bodies. Suppl.—2005.—N 5.—P. 283—290.
15. Jaschek M., Brandi E. Transuranium elements in HD 25354 // Astron. and Astrophys.—1972.—20, N 2.—P. 233—235.
16. Przybylski A. A. G0 star with high metal content // Nature.—1961.—189, N 4766.—P. 739.
17. Przybylski A. Line of holmium in the spectrum of HD 101065 // Acta Astronomica.—1963.—13, N 4.—P. 217—228.

18. *Przybylski A.* Can the peculiarities of HD 101065 be explained by fission of transuranium elements // *Proc. Astron. Soc. Austral.*—1975.—2.—P. 352—353.
19. *Przybylski A.* Is iron present in the atmosphere of HD 101065? // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—1977.—178, N 1.—P. 71—84.
20. *Przybylski A., Kennedy M.* The spectrum of HD 101065 // *Publ. Astron. Soc. Pacif.*—1963.—75, N 445.—P. 349—354.
21. *Ryabchikova T., Ryabtsev A., Kochukhov O., Bagnulo S.* Rare-earth elements in the atmosphere of the magnetic chemically peculiar star HD 144897 // *Astron. and Astrophys.*—2006.—456, N 1.—P. 329—338.
22. *Sansonetti J. E., Martin W. C., Young S. L.* Handbook of Basic Atomic Spectroscopic Data (ver. 1.1).—2004. [http:// physics.nist.gov/PhysRef.Data/Handbook](http://physics.nist.gov/PhysRefData/Handbook)
23. *Shavrina A. V., Khalack V., Polosukhina N. S., et al.* Lithium blend fitting for roAp star HD 101065 (Przybylski's star) // *Odessa Astron. Publ.*—2001.—14, N 1.—P. 249—252.
24. *Shavrina A. V., Polosukhina N. S., Pavlenko Ya. V., et al.* The spectrum of the Li 6708 Å spectral region // *Astron. and Astrophys.*—2003.—400, N 2.—P. 707—713.
25. *Wegner G., Petford A. D.* Abundance analysis of Przybylski's star (HD 101065) // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—1974.—168, N 3.—P. 557—575.
26. *Yushchenko A.* About the possibility of explanation of the spectrum of Przybylski's star by the lines of radioactive elements // *Proc. of Science International Symposium on Nuclear Astrophysics-Nuclei in Cosmos-IX, CERN, Switzeland, June 25—30, 2006.*
27. *Yushchenko A., Gopka V., Goriely S., et al.* Interplay between diffusion, accretion and nuclear reaction in the atmospheres of Sirius and Przybyski's star // *ASP Conf. Ser.*—2007.—362.—P. 46—54.
28. *Yushchenko A., Gopka V., Kim Chulhee, et al.* Chemical abundances patterns for sharp-lined stars // *J. Korean Astron. Soc.*—2002.—35.—P. 209—220.

Поступила в редакцию 23.02.07