

УДК 524.3-36

**Н. Г. Михайлицька**

Головна астрономічна обсерваторія Національної академії наук України  
03680 Київ, вул. Академіка Заболотного 27

**Ідентифікація ліній поглинання  
рідкоземельних елементів  
у ділянці спектру 610.25—610.57 нм  
гоАр-зір HD 101065, HD 134214, HD 137949, HD 24712**

*У ділянці спектру 610.25—610.57 нм гоАр-зорі HD 101065 ідентифіковано лінії поглинання рідкоземельних елементів, яких немає у відомих базах спектральних ліній атомів VALD та DREAM. Ідентифіковані лінії були використані при розрахунках синтетичних спектрів для гоАр-зір HD 137949, HD 134214, HD 24712. Визначено верхню межу оцінок  $lggf$  ідентифікованих ліній. За лініями Nd III 669.083 нм, Ca I 616.217 нм визначено модуль магнітного поля та параметр обертання/пульсації  $v \sin i$ . Для гоАр-зір HD 134214, HD 24712 вперше визначено вміст елемента за лініями Nd III. Розрахунки виконано за допомогою програми SynthM, складеної С. А. Ханом.*

*ИДЕНТИФИКАЦИЯ ЛИНИЙ ПОГЛОЩЕНИЯ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В УЧАСТКЕ СПЕКТРА 610.25—610.57 НМ ГОАР-ЗВЕЗД HD 101065, HD 134214, HD 137949, HD 24712, Михайлицька Н. Г. — В участке спектра 610.25—610.57 нм гоАр-звезды HD 101065 идентифицированы линии поглощения редкоземельных элементов, которых нет в известных базах спектральных линий атомов VALD и DREAM. Идентифицированные линии были использованы при расчетах синтетических спектров для гоАр-звезд HD 137949, HD 134214, HD 24712. Определен верхний предел оценок  $lggf$  идентифицированных линий. По линиям Nd III 669.083 нм, Ca I 616.217 нм определен модуль магнитного поля и параметр обращения/пульсаций  $v \sin i$ . Для гоАр-звезд HD 134214, HD 24712 впервые определено содержание элемента по линиям Nd III. Расчеты выполнены с помощью программы SynthM, составленной С. А. Ханом.*

*IDENTIFICATION OF ABSORPTION LINES OF RARE-EARTH ELEMENTS IN THE SPECTRAL REGION FROM 610.25 TO 610.57 NM FOR THE ROAP-STARS HD 101065, HD 134214, HD 137949, AND HD 24712, by Mykhailytska N. H. — In the spectral region from 610.25 to 610.57 nm of the roAp-star HD 101065, we performed the identification of the rare-earth element absorption lines which absent into the known database VALD and DREAM for atomic spectral lines. The identified lines were used for calculations of synthetic spectra for the roAp-stars HD 137949, HD 134214, and HD 24712. The upper limit of the estimates  $\lg gf$  for the identified lines was determined. Using Nd III 669.083 nm and Ca I 616.217 nm, the parameter of rotation/pulsation  $v \sin i$  and magnetic field module were determined. For the roAp-stars HD 134214 and HD 24712, the element abundance was first determined using the Nd III lines. The calculations were carried out with the help of the SynthM program developed by S. A. Khan.*

## ВСТУП

Перші дослідження зорі Пшибильського HD 101065 [17] показали, що вона має температуру  $T_{\text{еф}} = 6000$  К та сильно виражений покровний ефект. Пшибильський передбачив наявність магнітного поля цієї зорі та аномальний вміст хімічних елементів [17—19]. Вольф і Хаген визначили модуль магнітного поля близько 0.25 Тл [27].

Каулі і Матіс [6] провели аналіз хімічного складу роАр-зорі HD 101065 у спектральному діапазоні 390—650 нм, при цьому вперше було визначено вміст двічі іонізованих рідкоземельних елементів (Pr, Nd, Ce) та отримано оцінку модуля магнітного поля (0.25 Тл). У роботі [7] визначено вміст 67 іонів в атмосфері зорі, та за трьома спектральними лініями оцінено величину поверхневої складової магнітного поля (0.23 Тл).

В 1978 р. Куртц вперше виявив для Ар-зорі HD 101065 чіткі пульсації фотометричних кривих блиску у видимому діапазоні з періодом 12.14 хв і амплітудою  $0.013^m$  [11, 12, 14]. Швидкі осциляції блиску характерні для ряду Ар-зір, що утворюють групу роАр-зір (rapid oscillating Ap stars). Магнітні поля цих зір мають чітку структуру, що добре описується диполем. Напрямок осей обертання і диполя, як правило, не збігаються [13].

Для роАр-зорі HD 24712 в роботі [20] визначено вміст 29 іонів. В роботі Престона [16] дано оцінку магнітного поля, що має дипольну структуру: поздовжня (longitudinal) складова магнітного поля має відносно мале значення  $B_l = 0.04 \dots 0.15$  Тл, поверхнева (surface) складова має значення  $B_s = 0.29 \dots 0.35$  Тл.

Для роАр-зорі HD 137949 в роботі [21] визначено вміст Cr I, Fe I, Eu II, Eu III та поверхневу складову магнітного поля  $B_s = 0.49$  Тл. В роботі [22] уточнено значення поверхневої складової магнітного поля

$B_s = 0.5$  Тл та визначено вміст 30 іонів. Для гоАр-зір HD 134214, HD 137949 іони Fe I, Fe II, Ca I, Pr III досліджувались в роботах [3, 25].

Серія спектрів для зір з посиленням вмісту літію «Літій в СР-зорях» була отримана в Європейській південній обсерваторії для кількох гоАр-зір. Для гоАр-зорі HD 101065 в роботі [4] визначено вміст літію з урахуванням магнітного розщеплення спектральних ліній. В роботах [3, 25] за спектрами п'яти гоАр-зір проведено аналіз двох літєвих ліній 670.8 та 610.3 нм. Для гоАр-зір HD 101065, HD 137949, HD 134214 визначено вміст літію та ізотопне відношення  ${}^6\text{Li}/{}^7\text{Li}$ . Для гоАр-зорі HD 24712 з аналізу двох літєвих ліній [1] визначено верхню межу вмісту літію. При визначенні вмісту літію враховувався значний внесок блендувальних ліній рідкоземельних елементів (REE), модуль магнітного поля з компонентами  $B_r, B_m$ .

В спектрах гоАр-зір спостерігається надлишок вмісту REE (відносно Сонця), особливо в зорі Пшибильського. Спектри поглинання таких зір складні, багато ліній блендовані лініями REE. Попри те, що зоря Пшибильського за кількістю досліджених хімічних елементів вивчена дуже ретельно, велика кількість спектральних ліній, навіть дуже сильних, залишаються не ідентифікованими. Для оцінки внеску у спектр поглинання різних хімічних елементів потрібні нові лабораторні та теоретичні визначення величин  $\lg gf$  для ліній REE.

Метою роботи є ідентифікація рідкоземельних елементів поблизу лінії літію 610.3 нм у спектральній ділянці 610.25—610.57 нм в атмосфері найбільш пекулярної гоАр-зорі HD 101065. В роботах [3, 25] при розрахунках було враховано внесок ліній рідкоземельних елементів з невідомими значеннями  $\lg gf$  Sm II 610.3261 нм, Nd II 610.3371 нм, Dy II 610.3782 нм, Pr II 610.4051 нм, але значення величин  $\lg gf$  не наводились. Тому повторний розгляд цих ліній в даній роботі доповнює результат попередньої. Ототожнення виконано шляхом суміщення синтетичних (розрахованих) спектрів зі спостереженими. Ідентифіковані лінії були використані при розрахунках синтетичних спектрів для зір HD 24712, HD 137949, HD 134214.

В розглянутій ділянці 610.25—610.57 нм було проведено детальний аналіз спектру, розглянуто декілька варіантів синтетичних спектрів. Синтетичні профілі обчислено за допомогою програми SynthM, в якій враховано вплив магнітного поля. Програма складена С. А. Ханом [2].

Для зорі HD 101065 при обчисленнях використовувалась модель, розрахована Я. В. Павленком, зі збільшеною непрозорістю в лініях REE, з параметрами  $T_{\text{ef}} = 6600$  К,  $\lg g = 4.2$  та  $v_t = 1$  км/с [7, 26]. Для зір HD 137949, HD 134214, HD 24712 використовувались моделі Куруца [10] з параметрами відповідно:  $T_{\text{ef}} = 7500$  К,  $\lg g = 4.5$ ,  $v_t = 1$  км/с [22];  $T_{\text{ef}} = 7250$  К,  $\lg g = 4.5$ ,  $v_t = 1$  км/с [24];  $T_{\text{ef}} = 7250$  К,  $\lg g = 4.5$ ,  $v_t = 1$  км/с [20].

**Таблиця 1. Характеристики спостережень**

Зоря	Дата	Експозиція, хв	$\lambda$ , нм	Телескоп
HD 101065	09.03.2004	60	608.4—615.3	ESO
	10.03.2004	60	608.4—615.3	ESO
	11.03.2004	60	608.4—615.3	ESO
	08.03.1996	90	667.5—673.5	ESO
HD 24712	04.05.1996	22	609.6—670.0	ESO
HD 137949	09.04.2004	53	539.8—686.4	БТА
	13.03.1996	15	612.0—618.0	ESO
	12.03.1996	30	667.5—673.5	ESO
HD 134214	09.04.2004	73	539.8—686.5	БТА
	13.03.1996	60	612.0—618.0	ESO
	12.03.1996	60	667.5—673.5	ESO

### СПОСТЕРЕЖЕННЯ

В роботі використано спектри зір HD 101065, HD 24712, HD 137949, HD 134214 отримані з високим розділенням та високим відношенням сигнал/шум. Спектри зір HD 101065, HD 134214, HD 137949 були отримані П. Нортон в 1996 р. на 1.4-м телескопі CAT та куде-спектрометрі CES в обсерваторії Ла Сілла. Детектор — матриця ESO CCD N34 2048 2048 (розмір піксела 15 15 мкм, що забезпечило роздільну здатність  $R = 100\,000$ ).

Окрім того, спектри зорі HD 101065 були також отримані А. Хатцесем в березні 2004 р. з  $R = 100\,000$  (ESO/3.6m/HARPS). Обробка спектру ESO була виконана програмним пакетом IRAF. Спектри зорі HD 24712 отримані в травні 1996 р. з  $R = 80\,000$  (ESO).

Спектри зір HD 137949, HD 134214 були отримані Д. Кудрявцевим на 6-м телескопі БТА Спеціальної астрофізичної обсерваторії (САО) РАН з спектрографом NES. Детектор — матриця “Uppsala CCD” 2048 2048 пікселів розміром 15 15 мкм, що забезпечує роздільну здатність  $R = 45\,000$ ,  $S/N = 100$ . Характеристики спостережень наведено в табл. 1.

### ПАРАМЕТРИ АТОМНИХ ЛІНІЙ

Для розрахунків синтетичних спектрів використовувалися списки ліній із бази даних спектральних ліній атомів VALD [9], а також списки рідкоземельних елементів із бази даних DREAM [5]. Дані для ліній REE [5] були доповнені значеннями термів та факторами Ланде зі списку даних NIST [15]. Уточнені дані для Nd III 669.083 нм взято із роботи [23]. Довжини хвиль ліній Nd II 610.3081, Dy II 610.3365, Dy II 610.3794, Nd II 610.4096, Nd II 610.4062, Dy II 610.4133, Dy II 610.4289, Nd II 610.4410, Pr II 610.4990 нм були розраховані

методом, запропонованим в роботах [3, 26] з використанням інформації про рівні енергії REE із бази даних NIST, при цьому було враховано правило відбору ( $j=0, \pm 1$ ) та правило парного і непарного рівнів енергії. Інформація для лінії Dy II 610.3648 нм, важлива при визначенні літію, взята із робіт [3, 25], причому Р. Квіне (DREAM) спеціально розрахував теоретично значення величини  $I_{ggf}$  (табл. 3). Розраховані лінії з невідомими значеннями  $I_{ggf}$  Sm II 610.3261, Nd II 610.3371, Dy II 610.3782, Pr II 610.4051 нм враховувались при розрахунках в роботах [3, 25].

Значення  $I_{ggf}$  для ліній з невідомими силами осциляторів були визначені шляхом оптимального суміщення спостережних та синтетичних спектрів.

Для визначення модуля магнітного поля (компоненти  $B_r$  та  $B_m$  розділяються слабо) використовувалися спектральні лінії Ca I 616.217 нм та Nd III 669.083 нм. Параметри ліній REE наведені в табл. 4.

#### ВИЗНАЧЕННЯ $v \sin i$

Для  $\alpha$  зір спостерігаються зміни блиску. Амплітуда осциляцій блиску, як і інтенсивність магнітного поля, може модулюватись обертанням зорі. Щоб пояснити це явище, Куртц запропонував модель нахиленого пульсатора, в якому напрям осі пульсацій збігається з напрямком осі магнітного поля, нахиленої до осі обертання [13]. Розширення спектральних ліній внаслідок обертання не завжди можна відрізнити від розширення, зумовленого пульсаціями, обидва ефекти є результатом доплерівських зміщень і моделюються параметром обертання  $v \sin i$ . Оскільки  $\alpha$  зорі HD 101065, HD 137949, HD 134214 дуже повільно обертаються, то параметр  $v \sin i$ , найімовірніше, описує їхнє пульсаційне розширення [3, 25, 26]. Для зорі HD 24712, що має відомий період обертання, параметр  $v \sin i$  описує обертання та пульсації [1, 20].

Параметр  $v \sin i$  в даній роботі було визначено за лініями Nd III 668.083 нм та Ca I 616.217 нм. Ці лінії під впливом магнітного поля розщеплюються частково на дві складові, що дає можливість відокремити вплив магнітного поля від впливу параметра  $v \sin i$ .

На рис. 1 показано спостережувані та синтетичні профілі лінії Nd III 668.083 нм для зір HD 24712, HD 101065, HD 134214, HD 137949 при різних значеннях параметрів пульсаційного розширення  $v \sin i$  та модуля магнітного поля  $B$  (див. табл. 2). Оптимального суміщення спостережних та синтетичних спектрів досягнуто для значень параметра  $v \sin i = 3.0$  км/с (HD 101065), 4.5 км/с (HD 24712), 2.5 км/с (HD 134214), 4.5 км/с (HD 137949).

За лінією Ca I 616.217 нм визначено параметр  $v \sin i$  для зір HD 24712, HD 134214, HD 137949 (рис. 2). Найкраще спостережним

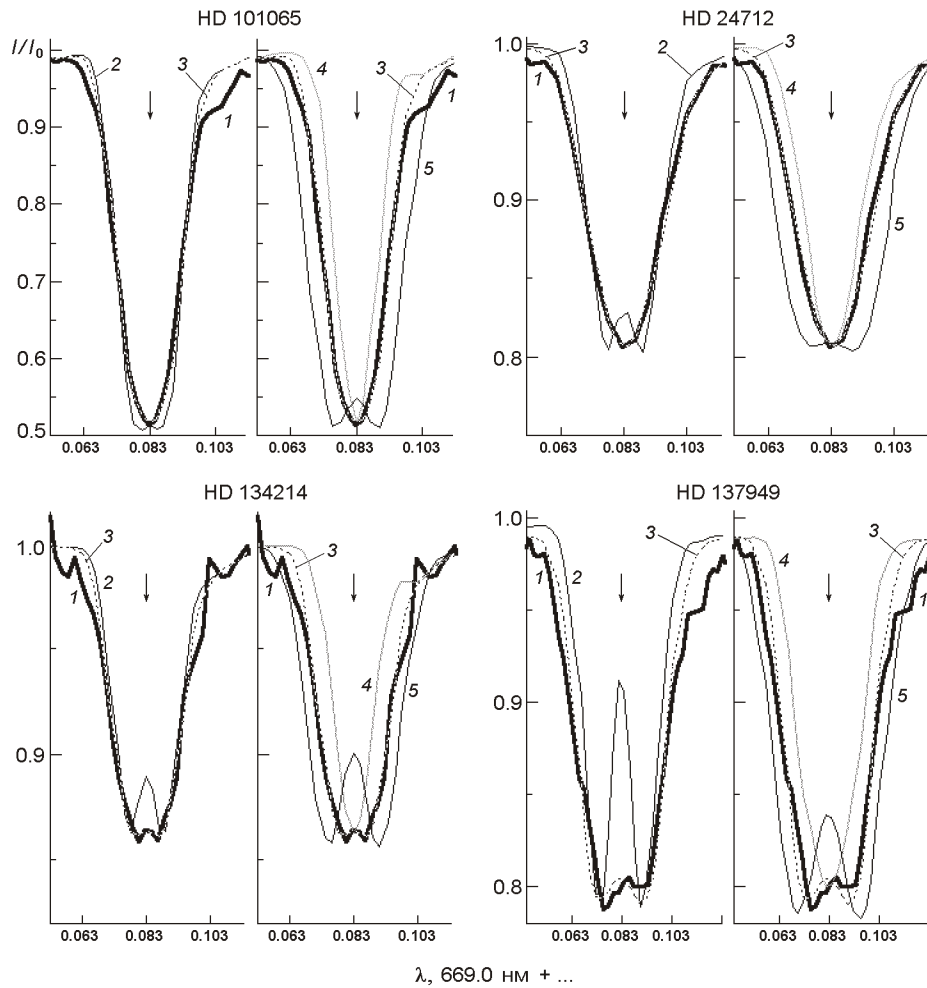


Рис. 1. Спостережені (криві 1) та синтетичні (криві 2—5) профілі лінії Nd III 669.083 нм для зірок HD 101065, HD 24712, HD 134214, HD 137949 при різних значеннях параметрів  $v \sin i$  та  $B$  (див. табл. 2)

Таблиця 2. Характеристики синтетичних профілів лінії Nd III

Профіль	HD 101065		HD 24712		HD 134214		HD 137949	
	$v \sin i$ , км/с	$B$ , Тл	$v \sin i$ , км/с	$B$ , Тл	$v \sin i$ , км/с	$B$ , Тл	$v \sin i$ , км/с	$B$ , Тл
2	0	0.26	0	0.31	0	0.32	0	0.50
3	3.0	0.26	4.5	0.31	2.5	0.32	4.5	0.50
4	3.0	0.11	4.5	0.16	2.5	0.17	4.5	0.35
5	3.0	0.41	4.5	0.46	2.5	0.47	4.5	0.65

спектрам відповідають значення  $v \sin i = 5$  км/с (HD 24712), 2.5 км/с (HD 134214), 4 км/с (HD 137949). Отримані оцінки параметра  $v \sin i$  за лініями Nd III та Ca I для вказаних зірок наведено у табл. 3.

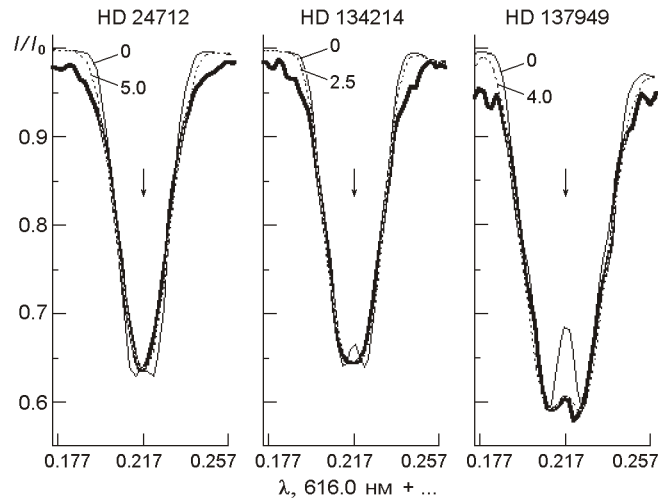


Рис. 2. Спостережені (суцільна жирна лінія) та синтетичні профілі лінії Ca I 616.217 нм для зір HD 24712, HD 134214, HD 137949 (модуль напруженості магнітного поля  $B = 0.40, 0.45, 0.63$  Тл відповідно). Числа біля кривих — значення  $v \sin i$  (км/с)

Таблиця 3. Отримані оцінки параметра  $v \sin i$

Зоря	$v \sin i$ , км/с		
	Ca I 616.217 нм	Nd III 669.08 нм	Інші оцінки
HD 24712	5	4.5	5.6 [20]; 4.5 [1]
HD 101065	—	3	2.0 [7]; 3.5 [3]
HD 134214	2.5	2.5	2.5; 2.0 [3]; 2.0 [24]
HD 137949	4	4.5	3.0; 4.0 [3]; <2.0 [22]

## АНАЛІЗ СПЕКТРУ

Детальний аналіз виконано шляхом суміщення синтетичних спектрів зі спостереженими в ділянці 610.25—610.57 нм, де розташована лінія літію, і де основний внесок у непрозорість роблять лінії рідкоземельних елементів з відомими та з вперше визначеними в даній роботі силами осциляторів.

Для зорі HD 101065 значення  $\lg gf$  для частини ліній REE були визначені шляхом оптимального суміщення синтетичного і спостереженого спектрів. Надалі вони використовувались при розрахунках для зір HD 137949, HD 134214, HD 24712.

При розрахунках синтетичних спектрів враховано вплив магнітного поля на спектральні лінії. Для зорі HD 101065 розглянуто ділянку спектру, що включає лінію Ca I 610.2723 нм, лінії літію, лінії REE та відносно чисту спектральну лінію Co I 610.552 нм. На ділянці спектру 610.20—610.42 нм приймалось значення модуля магнітного поля  $H = 0.24$  Тл ( $B_r = 0$ ;  $B_m = 0.24$  Тл) [3, 25]. Ділянці спектру 610.42—610.57 нм краще відповідало значення  $H = 0.26$  Тл ( $B_r = 0$ ;



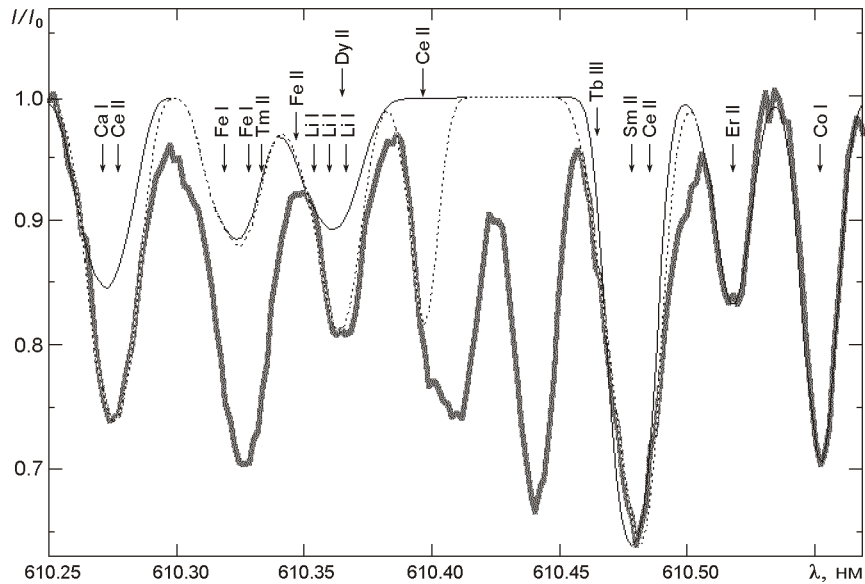


Рис. 3. Синтетичні спектри HD 101065, побудовані з використанням бази даних VALD (суцільна тонка лінія) та об'єднаної бази даних VALD та DREAM (пунктирна лінія). Суцільна жирна лінія — спостережений спектр

$B_m = 0.26$  Тл). Спостережений профіль лінії Co I добре описується профілем, розрахованим при значенні  $H = 0.17$  Тл ( $B_r = 0$ ;  $B_m = 0.17$ ). Розрахунки зроблено із значенням параметра  $v \sin i = 3$  км/с, отриманим по лінії Nd III 669.083 нм.

Лініями із списку даних VALD [9] в досліджуваній ділянці описується бленда Fe II, Er II та відносно чиста лінія Co I 6105.52 нм. Лініями літію спостережений профіль описується частково; Ca I 610.272 нм та Sm II 610.478 нм спостережені профілі не заповнюють (рис. 3, суцільна тонка лінія). Тому для описання вибраної спектральної ділянки список ліній із бази даних VALD [9] був доповнений лініями REE із бази даних DREAM [5]. При цьому спостережені профілі описуються лініями Ca I 610.2723, Ce II 610.2762; Li I та Dy II 610.3648; лінія Ce II 610.397 нм частково заповнила бленду з центром 610.40 нм; лінії Tb III 610.465, Sm II 610.478, Ce II 610.485 нм описали бленду з центром 610.48 нм (рис. 3, пунктирна лінія).

Не описаними лишились бленди 610.33, 610.40 та 610.44 нм. Тому список ліній був знову доповнений розрахованими лініями. Для описання бленд підійшли лінії Sm II 610.326, Pr II 610.4051 [3, 25], Nd II 610.441 нм (рис. 4, суцільна тонка лінія).

Щоб покращити описання вибраної спектральної ділянки список ліній був знову доповнений лініями REE Nd II 610.3371 нм, Dy II 610.3782 нм, [3,25], Nd II 610.3081 нм, Dy II 610.4133 нм; Dy II 610.4289 нм; Pr II 610.4990 нм (рис. 4, пунктирна лінія).



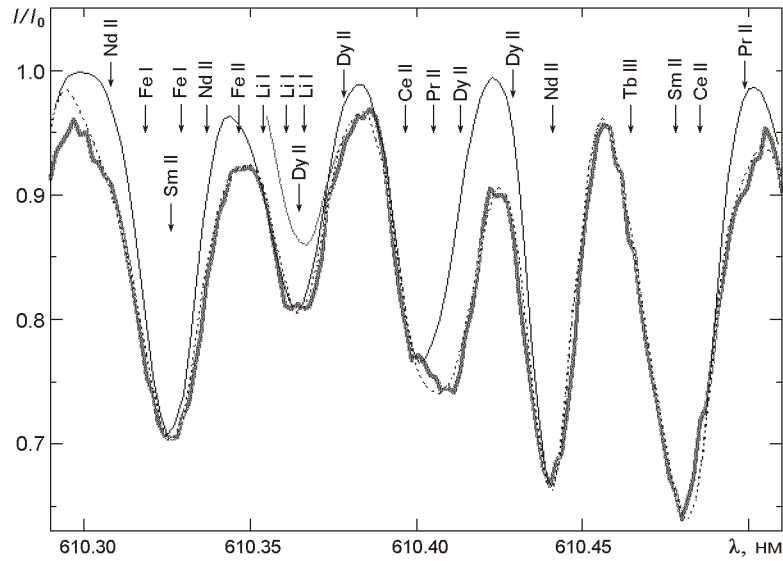


Рис. 4. Синтетичні спектри HD 101065, побудовані з використанням об'єднаної бази даних VALD та DREAM, доповненої лініями Sm II 610.3261, Pr II 610.4051, Nd II 610.4410 нм (суцільна тонка лінія), об'єднаної бази даних VALD та DREAM, доповненої лініями Nd II 610.3081, Sm II 610.3261, Nd II 610.3371, Dy II 610.3782, Pr II 610.4051, Dy II 610.4133, Dy II 610.4289, Nd II 610.4410, Pr II 610.4990 нм (пунктирна лінія), а також синтетичний профіль, побудований лініями Dy II 610.3648, Dy II 610.3782 нм без вкладу літію (суцільна сіра лінія). Суцільна жирна лінія — спостережений спектр

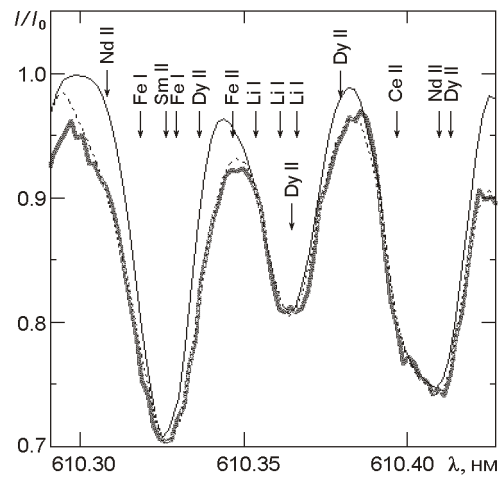


Рис. 5. Спектри HD 101065, розраховані з використанням об'єднаної бази даних VALD та DREAM, доповненої лініями Sm II 610.326, Nd II 610.4096 нм (суцільна тонка лінія) або лініями Nd II 610.3081, Sm II 610.326, Dy II 610.3365, Dy II 610.3794, Nd II 610.4096, Dy II 610.4133 нм. Суцільна жирна лінія — спостережений спектр

Зазначимо, що ділянку спектру, описану лініями Nd II 610.3371, Dy II 610.3782, Pr II 610.4051 нм, можна так само добре описати лініями Dy II 610.3365, Dy II 610.3792, Nd II 610.4096 нм відповідно (рис. 5). Лінії Nd II 610.4096 нм або Pr II 610.4051 нм можна замінити на Nd II 610.4062 нм. Проте з використанням цієї лінії бленда 610.40 нм описується гірше (рис. 6).

Бленди 610.33, 610.36, 610.40, 610.44 та 610.48 нм описались лініями відповідно:

Nd II 610.3081, Sm II 610.3261, Dy II 610.3365 нм  
(або Nd II 610.3371 нм);  
Li I, Dy II 610.3648, Dy II 610.3782 (або Dy II 610.3794 нм);  
Ce II 610.3967, Pr II 610.4051 (або Nd II 610.4096 нм),  
Dy II 610.4133 нм;  
Dy II 610.4289, Nd II 610.4410 нм;  
Tb III 610.4647, Sm II 610.4781, Ce II 610.4853, Pr II 610.4990 нм.

Найкраще синтетичні та спостережені спектри узгоджуються при урахуванні вкладу розрахованих на основі рівнів енергії ліній REE. Значення  $\lg gf$  для цих ліній підбирались із кращого суміщення спостереженого та синтетичного спектрів. Визначено верхню межу величин  $\lg gf$  (див. табл. 4).

У табл. 5 приведено дані про вміст атомів відповідних елементів, отриманих із кращого співпадання синтетичного та спостереженого спектрів.

Розраховані лінії, що добре описали спектр HD 101065, були використані для описання цієї ділянки спектру для зір HD 137949, HD 134214,

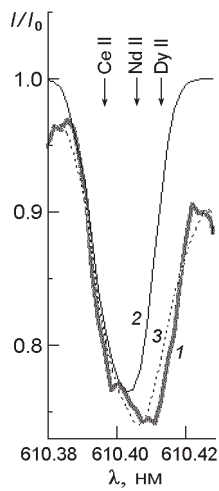


Рис. 6. Синтетичні спектри HD 101065, побудовані з використанням ліній Ce II 610.3967 нм, Nd II 610.4062 нм (крива 2); та з використанням ліній Ce II 610.3967, Nd II 610.4062, Dy II 610.4133 нм (крива 3). Суцільна крива 1 — спостережений спектр

Таблиця 4. Атомні дані ліній REE

Лінія, нм	$\lg gf$	$E, \text{см}^{-1}$	$J$	$E, \text{см}^{-1}$	$J$	Джерело	$T_{\text{лов}}$	$g$	$T_{\text{ур}}$	$g$	Джерело
Ce II 610.2762	-1.67	7259	3.5	23641	4.5	[5]	$^2F$	1.140	$^4F$	1.333	[15]
Nd II 610.3081	-1.95	15148	5.5	31528	5.5	calc	$^4G$	1.230	—	1.000	[15]
Sm II 610.3261	-2.15	9410	2.5	25790	3.5	calc	$^8D$	2.010	—	1.250	[15]
Dy II 610.3365	-0.94	25214	4.5	41594	4.5	calc	—	1.010	—	1.148	[15]
(або Nd II 610.3371)	-2.14	12222	3.5	28602	4.5			0.957		1.265	[15]
Dy II 610.3648	-3.60	4756	6.5	21135	6.5	[5]	—	1.130	—	1.240	[15]
Dy II 610.3782	-0.55	32679	4.5	49058	5.5	calc	—	1.130	—	1.380	[15]
(або Dy II 610.3794)	-1.74	22116	6.5	38495	5.5	calc	—	1.200	—	1.137	[15]
Ce II 610.3967	-1.59	15236	1.5	31614	0.5	[5]	$^4F$	0.650	—	—	[15]
Pr II 610.4051	-1.04	9768	4.0	26146	5.0	calc	—	0.85	—	1.050	[15]
(або Nd II 610.4096)	-2.81	1470	5.5	17848	5.5	calc	$^6I$	1.035	—	1.230	[15]
*Nd II 610.4062	—	22358	4.5	38736	5.5	calc	—	1.080	—	0.915	[15]
Dy II 610.4133	-0.75	25773	6.5	42150	5.5	calc	—	1.370	—	1.100	[15]
Dy II 610.4289	-0.60	30113	7.5	46491	6.5	calc	—	1.208	—	1.229	[15]
Nd II 610.4410	-1.85	8421	4.5	24797	4.5	calc	$^6I$	0.840	—	0.975	[15]
Tb III 610.4647	-3.25	2805	6.5	19181	5.5	[5]	$^6H$	—	$^8F$	—	[15]
Sm II 610.4781	0.04	14501	7.5	30881	6.5	[9]	$^8G$	1.46	—	1.42	[9]
Ce II 610.4853	-0.93	15859	4.5	32235	3.5	[5]	—	1.20	—	1.111	[15]
Pr II 610.4990	-1.70	8380	5.0	24755	4.0	calc	—	0.660	—	0.908	[15]
Er II 610.5179	-1.35	17380	6.5	33752	6.5	[9]	—	1.130	—	1.200	[9]
Nd III 669.083	-2.46	3715	7.0	18656	6.0	[25]	$^5I$	1.177	$^5I$	1.054	[25]

\* — лінія малої ймовірності

**Таблиця 5. Вміст атомів, лінії яких вносять основний вклад у спектри поглинання атмосфер HD 101065, HD 137949, HD 134214, HD 24712**

Іон, нм	HD 101065		HD 137949		HD 134214		HD 24712	
	$\lg N_i = 1$	$\lg N(H) = 12$	$\lg N_i = 1$	$\lg N(H) = 12$	$\lg N_i = 1$	$\lg N(H) = 12$	$\lg N_i = 1$	$\lg N(H) = 12$
Ca I 610.272	-7.08	4.96	-5.45	6.59	-5.63	6.41	-6.03	6.01
Ce II 610.2761	-7.80	4.24	-7.60	4.44	-8.15	3.89	-8.80	3.24
Nd II 610.3081	-7.65	4.39	-8.10	-3.94	—	—	—	—
Fe I 610.3186	-4.90	7.14	-4.06	7.98	-4.37	7.67	-4.61	7.43
Sm II 610.3261	-7.75	4.29	-8.07	3.97	-8.35	3.69	-9.00	3.04
Fe I 610.3293	-4.90	7.14	-4.10	7.94	-4.37	7.67	-4.61	7.43
Tm II 610.3294	-7.80	4.24	—	—	—	—	—	—
Dy II 610.3365	-7.90	4.14	-8.30	3.74	—	—	—	—
(або Nd II 610.3371)	-7.65	4.39	-8.10	3.94	—	—	—	—
Tm II 610.3395	-7.80	4.24	—	—	—	—	—	—
Fe II 610.3496	-4.90	7.14	-3.68	8.36	-4.37	7.67	-4.61	7.43
Dy II 610.3648	-7.30	4.74	-8.00	4.04	-8.35	3.69	-9.00	3.04
Dy II 610.3782	-7.90	4.14	-8.00	4.04	—	—	—	—
(або Dy II 610.3794)	-7.90	4.14	-8.00	4.04	—	—	—	—
Ce II 610.3967	-7.51	4.53	-7.90	4.14	—	—	—	—
Pr II 610.4051	-8.80	3.24	-9.00	3.04	—	—	—	—
Dy II 610.4133	-7.60	4.44	-8.30	3.74	—	—	—	—
(або Ce II 610.3967)	-7.39	4.65	-7.90	4.14	—	—	—	—
Nd II 610.4096	-7.65	4.39	-8.10	3.94	—	—	—	—
Dy II 610.4133)	-8.20	3.84	-8.30	3.74	—	—	—	—
Dy II 610.4289	-7.90	4.14	-8.30	3.74	—	—	—	—
Nd II 610.4410	-7.65	4.39	-8.10	3.94	—	—	—	—
Tb III 610.4647	-7.00	5.04	-7.75	4.29	-8.70	3.34	-9.00	3.04
Sm II 610.478	-8.90	3.14	-9.07	2.97	-9.95	2.09	-10.50	1.54
Ce II 610.485	-7.97	4.07	-7.80	4.24	-8.85	3.19	-9.00	-3.04
Pr II 610.499	-8.80	3.24	-8.65	3.39	-9.70	3.34	-9.90	-2.14
Fe I 610.513	-5.10	6.94	-3.95	8.09	-4.30	7.74	-4.50	7.54
Er II 610.518	-8.10	3.94	-7.85	4.19	—	—	—	—
Co I 610.5520	-5.13	6.91	—	—	—	—	—	—
Ca I 616.2173	—	—	-5.61	6.43	-5.67	6.37	-6.26	5.78
Nd III 619.0830	-6.34	5.70	-6.62	5.42	-7.20	4.84	-6.95	5.09

HD 24712. При розрахунках синтетичних спектрів приймалися значення параметрів: для HD 137949 —  $v \sin i = 3.5$  км/с,  $H = 0.51$  Тл ( $B_r = 0.30$ ,  $B_m = 0.41$  Тл); для HD 134214 —  $v \sin i = 2.5$  км/с,  $H = 0.33$  Тл ( $B_r = 0.17$ ,  $B_m = 0.28$  Тл); для HD 24712 —  $v \sin i = 4.5$  км/с,  $H = 0.284$  ( $B_r = 0.05$ ,  $B_m = 0.28$  Тл).

Вміст атомів Ca, Fe в атмосферах зірок HD 137949, HD 134214, HD 24712 більший, ніж в атмосфері HD 101065, а вміст атомів рідкоземельних елементів — менший.

При заміні розрахованих ліній Nd II 610.3371 нм, Dy II 610.3782 нм, Pr II 610.4051 нм на Dy II 610.3365 нм, Dy II 610.3792 нм, Nd II 610.4096 нм синтетичні спектри для зір HD 137949, HD 134214, HD 24712 мало відрізняються.

Модуль магнітного поля зорі HD 137949 ( $H = 0.51$  Тл) значно більший, ніж для зорі HD 101065 ( $H = 0.26$  Тл), тому розширені магнітним полем лінії літію злились в одну бленду з сильними лініями заліза; лінії Tb III, Sm II, Ce II, Pr II, Fe I, Er II злились в одну бленду.

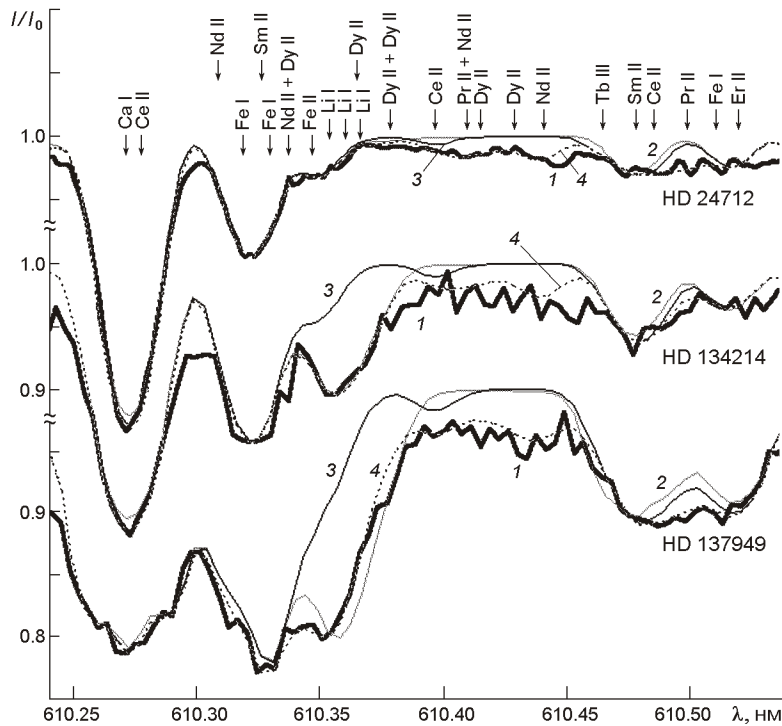


Рис. 7. Спектри зірок HD 137949, HD 134214 і HD 24712: 1 — спостережені спектри, 2 — синтетичні спектри, розраховані з використанням ліній із бази спектральних атомних даних VALD; 3 — синтетичні спектри, розраховані з використанням ліній із баз VALD та DREAM (без вкладу літію); 4 — синтетичні спектри, розраховані з використанням ліній із баз VALD та DREAM, доповнених лініями Nd II 610.3081, Sm II 610.3261, Nd II 610.3371 нм (або Dy II 610.3365 нм), Dy II 610.3782 нм (або Dy II 610.3792 нм), Pr II 610.4051 нм (або Nd II 610.4096 нм), Dy II 610.4133, Dy II 610.4289, Nd II 610.4410, Pr II 610.4990 нм

Найкращого суміщення спостереженого і синтетичного спектрів досягнуто при урахуванні вкладу розрахованих на основі рівнів енергії бази даних NIST ліній Nd II 610.3081, Sm II 610.3261, Nd II 610.3371 нм (або Dy II 610.3365 нм), Dy II 610.3782 нм (або Dy II 610.3792 нм), Pr II 610.4051 нм (або Nd II 610.4096 нм), Dy II 610.4133, Dy II 610.4289, Nd II 610.4410, Pr II 610.4990 нм, що і є підтвердженням вкладу цих ліній. На рис. 7 показані відповідні синтетичні спектри.

Вміст атомів рідкоземельних елементів для зірок HD 134214, HD 24712 менший, ніж в атмосферах зір HD 101065 та HD 137949, тому в атмосферах цих зір видно тільки сильні лінії REE. Для даної ділянки спектру ледь помітна бленда Tb III, Sm II, Ce II, Pr II.

В табл. 5 дано вміст атомів, отриманих із кращого співпадання синтетичного спектру та спектру, що спостерігається.

Для зорі HD 101065 вміст хімічних елементів узгоджується з даними роботи [7], за винятком лінії Sm II 610.4781 нм. Ідентифіковані поряд елементи Tb III, Ce II з відомими силами осциляторів списку даних DREAM, хімічний елемент Pr II з невідомою силою осцилятора

лежить у крилі бленди та не впливає на визначення вмісту за лінією Sm II 610.4781 нм. Лінія Sm II 610.4781 нм у спектрах розглянутих зір описалась зі зменшеним вмістом. Можливо, для неї значення  $lggf = 0.040$  на 1.0 dex помилкове або спектральна лінія поглинання Sm II 610.4781 нм утворюється в інших атмосферних шарах, ніж більшість ліній поглинання цього хімічного елемента.

## ВИСНОВКИ

Детальний аналіз спектрів гоAr-зірок HD 101065, HD 137949, HD 134214, HD 24712 виконано у ділянці спектру 610.25—610.57 нм. При розрахунках враховано магнітне поле зірок та параметр обертання/пульсацій  $v \sin i$ , визначені за лініями Nd III 669.083 нм, Ca I 616.217 нм (табл. 3). Оцінки параметрів  $v \sin i$  та магнітного поля узгоджуються з даними робіт [1, 3, 7, 20, 22, 25, 24].

Розглянуто три варіанти синтетичних спектрів: 1) розрахованих з використанням ліній із бази спектральних атомних даних VALD [5]; 2) розрахованих з використанням ліній із бази спектральних атомних даних VALD [9] та DREAM [5]; 3) розрахованих з використанням ліній із бази спектральних атомних даних VALD [9] та DREAM [5], доповнених лініями, розрахованими на основі рівнів енергії. Довжини хвиль були розраховані за методикою [3, 26] з використанням інформації про рівні енергії REE бази даних NIST [15], при цьому було враховано правило відбору ( $j = 0, \pm 1$ ) та правило парного і непарного рівнів енергії. Синтетичний та спостережені спектри добре збігаються при урахуванні внеску розрахованих ліній.

В роботах [3, 25] було ідентифіковано лінії рідкоземельних елементів Sm II 610.3261 нм, Nd II 610.3371 нм, Dy II 610.3782 нм, Pr II 610.4051 нм, але значення величин  $lggf$  не приводились. В нашій роботі підтверджено наявність лінії Sm II 610.3261 нм та визначено, що лінії Dy II 610.3365 нм та Nd II 610.3371 нм; Dy II 610.3782 нм та Dy II 610.3794 нм; Pr II 610.4051 нм та Nd II 610.4096 нм однаково ймовірні у спектрах гоAr-зір. Визначено верхню межу сил осциляторів  $lggf$  для цих ліній (табл. 4).

Ідентифіковано лінії REE з невідомими силами осциляторів, відсутні у базах даних спектральних ліній атомів VALD та DREAM. Це лінії Nd II 610.3081 нм, Dy II 610.4133 нм, Dy II 610.4289 нм, Nd II 610.4410 нм, Pr II 610.4990 нм. Визначено верхню межу сил осциляторів  $lggf$  для ліній, розрахованих на основі рівнів енергії (табл. 4).

Визначено вміст Fe I, Fe II, Ca I, Ce II, Sm II, Tb III, Er II, Nd III з відомими силами осциляторів, взятими зі списку рідкоземельних елементів бази даних VALD та DREAM, для яких терми та фактори Ланде були взяті із списку даних NIST. Для зір HD 134214, HD 24712 вперше визначено вміст Nd III.

Автор дякує А. В. Шавріній за всебічну допомогу, А. Хатцесу, П. Норту, Д. Кудрявцеву за надані спектри зір, Я. В. Павленкові за модель атмосфери та обговорення результатів, адміністраціям баз атомних даних VALD, DREAM, NIST, доступних через інтернет, Г. У. Ковальчукові за консультацію, а також С. А. Ханові за програму синтетичного спектру SynthM.

1. Михайлицька Н. Г. Аналіз ліній літію в атмосфері гоАр-зорі HD 24712 // Кинематика и физика небес. тел.—2007.—**23**, № 3.—С. 148—157.
2. Хан С. А. Расчет синтетических спектров звезд с учетом влияния магнитного поля и стратификации и химических элементов с глубиной // Кинематика и физика небес. тел.—2003.—**19**, № 6.—С. 534—547.
3. Шаврина А. В., Полосухина Н. С., Хан С. и др. Литий и изотопное отношение  ${}^6\text{Li}/{}^7\text{Li}$  в атмосферах нескольких гоАр-звезд с узкими линиями // Астрон. журн.—2006.—**83**, № 6.—С. 1—12.
4. Шаврина А. В., Халак В. П., Михайлицькая Н. Г., Полосухина Н. С. Учет магнитного расщепления линий при определении содержания лития в атмосфере гоАр-звезды HD 101065 // Кинематика и физика небес. тел.—2004.—**20**, № 1.—С. 43—52.
5. Biemont E., Palmeri P., Quinet P. A new database of astrophysical interest // *Astrophys. and Space Sci.*—1999.—**269/270**.—P. 635—637.—(D.R.A.M. Database on Rare Earth at Mons. Univ. <http://www.umh.ac.be/astro/dream.shtml>).
6. Cowley C. R., Mathys G. Line Identification and preliminary abundance from the red spectrum of HD 101065 (Przybylski's star) // *Astron. and Astrophys.*—1998.—**339**, N 1.—P. 165—169.
7. Cowley C. R., Ryabchikova T., Kupka F., et al. Abundances in Przybylski star // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2000.—**317**, N 1.—P. 299—309.
8. Kochukhov O., Ryabchikova T. A., Weiss W., et al. Line profile variations in rapidly oscillating Ap stars: resolution of the enigma // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2007.—**376**, N 2.—P. 651—672.
9. Kupka F., Piskunov N. E., Ryabchikova T. A., et al. VALD-2: Progress of the Vienna Atomic Line Data Base // *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.*—1999.—**138**, N 1.—P. 119—133.
10. Kurucz R. CDR N 1—23. — Cambridge, MA: Smithsonian Astrophys. Observatory, 1993—1994.
11. Kurtz D. W. 12.15 Minute light variations in Przybylski star, HD 101065 // *Inform. Bull. Var. Stars.*—1978.—N 1436.—P. 1—2.
12. Kurtz D. W. Frequency of the light variability of 101065, Przybylski star // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—1980.—**190**, N 1.—P. 103—111.
13. Kurtz D. W. Rapidly oscillating Ap stars // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—1982.—**200**, N 3.—P. 807—859.
14. Kurtz D., Wegner G. The nature of Przybylski's star — an AP star model inferred from the light variations and temperature // *Astrophys. J.*—1979.—**232**, N 2.—P. 510—519.
15. Martin W. C., Reader J., Wiese W. L. NIST compilations and databases for atomic spectra // 25th meeting of the IAU, Joint Discussion 17 — Sydney, 2003.—P. 13—(<http://physics.nist.gov/cgi-bin/AtData>).
16. Preston G. W. The unique magnetic and spectrum variations of HD 24712 // *Astro-phys. J.*—1972.—**175**, N 2.—P. 465—472.

17. *Przybylski A.* HD 101065 — a G0 star with high metal content // *Nature*.—1961.—**189**, N 4766.—P. 739.
18. *Przybylski A.* HD 101065 — an astronomical enigma // *Nature*.—1966.—**210**, N 1.—P. 20—22.
19. *Przybylski A.* The effective temperature and electron pressure in the atmosphere of HD 101065 // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—1977.—**178**, N 3.—P. 735—743.
20. *Ryabchikova T. A., Landstreet J. D., Gelbmann M. J., et al.* Abundance analysis of roAp stars. IV. HD 24712 // *Astron. and Astrophys.*—1997.—**327**, N 3.—P. 1137—1146.
21. *Ryabchikova T. A., Piskunov N., Savanov I., et al.* Eu III identification and Eu II abundance in CP stars // *Astron. and Astrophys.*—1999.—**343**, N 1.—P. 229—236.
22. *Ryabchikova T. A., Nesvacil N., Weiss W. W., et al.* The Spectroscopic signature of roAp stars // *Astron. and Astrophys.*—2004.—**423**, N 2.—P. 705—415.
23. *Ryabchikova T., Ryabtsev A., Kochukhov O., et al.* Rare-earth elements in the atmosphere of the magnetic chemically peculiar star HD 144897 // *Astron. and Astrophys.*—2006.—**456**, N 1.—P. 329—338.
24. *Ryabchikova T., Sachkov M., Kochukhov O., et al.* Pulsation tomography of rapidly oscillating Ap Stars // *Astron. and Astrophys.*—2007.—**473**, N 3.—P. 907—922.
25. *Shavrina A. V., Polosukhina N. S., Khan S., et al.* Lithium and its isotopic ratio  ${}^6\text{Li}/{}^7\text{Li}$  in the atmospheres of some sharp-lined roAp stars // *Proc. IAU Symp.*—2004.—N 224.—P. 119—123.
26. *Shavrina A. V., Polosukhina N. S., Pavlenko Ya. V., et al.* The spectrum of the roAp star HD 101065 (Przybylski's star) in the Li I 6708 Å spectral region // *Astron. and Astrophys.*—2003.—**409**, N 2.—P. 707—717.
27. *Wolff S. C., Hagen W.* The magnetic field of HD 101065 // *Publs Astron. Soc. Pacif.*—1976.—**88**, N 522.—P. 119—121.

Надійшла до редакції 18.06.09