

doi: <https://doi.org/10.15407/kfnt2022.02.063>

УДК 524.314-355

**В. Ф. Гопка¹, А. В. Шавріна², В. О. Ющенко^{2,4},
Я. В. Павленко², О. В. Ющенко³, Л. В. Глазунова⁵**

¹Науково-дослідний інститут «Астрономічна обсерваторія»

Одеського національного університету імені І. І. Мечникова

вул. Маразліївська 1 в, Одеса, Україна, 65014

²Головна астрономічна обсерваторія Національної академії наук України,

вул. Академіка Заболотного 27, Київ, Україна, 03143

³Дослідний інститут Астрокамп Контентс, Гойанг, 10-329, Республіка Корея

⁴Одеський морський університет,

вул. Мечникова 34, Одеса, Україна, 65029

⁵Одеська національна академія телекомунікацій,

вул. Кузнєцька 1, Одеса, Україна, 65029

E-mails: vfopka@ukr.net, shavrina2@gmail.com, yp@mao.kiev.ua,

avyushchenko@gmail.com, lvglazunova@gmail.com

Аналіз вмісту актинію в атмосфері цефеїди HIP13962

Актиній, радіоактивний елемент, що має ізотоп ^{227}Ac з найбільшим періодом піврозпаду всього 21.772(3) роки, є третім елементом з групи актиноїдів, разом з торієм та ураном, вміст яких досліджується в атмосферах зір. Його наявність в атмосфері тієї чи іншої зорі вказує на певний механізм, в результаті якого він виробляється. Як показали перші дослідження ліній поглинання актинію у спектрах зір, їхня поява у спектрі пов'язана з наявністю деформованих ліній поглинання сильних ліній, таких як лінії водню та лінії дублету натрію. В деяких випадках профілі цих ліній мають емісійну складову. Ми провели пошук ліній поглинання актинію у спектрах пульсуючих зір — цефеїд, для яких характерним є наявність деформованих сильних ліній. В нашій роботі досліджуються лінії поглинання актинію в інтервалі $= 378.0...887.7$ нм у спектрі зорі-втікача (run-away star) HIP 13962, яка класифікується як цефеїда. Спектр зорі було отримано в 2014 році на 1.8-м телескопі обсерваторії Бохунсан, Південна Корея (Bohunsan Optical Astronomical Observatory (BOAO), South Korea) зі спектральною роздільністю більшою ніж $R = 80000$. Також аналізувався архівний спектр HIP 13962 за 1995 рік в діапазоні довжин хвиль $= 400...680$ нм зі спектральною роздільністю $R = 42\ 000$, отриманий на 1.93-м телескопі обсерваторії От-Прованс (Франція). Як показали

© В. Ф. ГОПКА, А. В. ШАВРІНА, В. О. ЮЩЕНКО,

Я. В. ПАВЛЕНКО, О. В. ЮЩЕНКО, Л. В. ГЛАЗУНОВА, 2022

розрахунки, в атмосфері зорі HIP 13962 вміст актинію становить $\lg N(\text{Ac}) = -1.2$ в шкалі вмісту водню $\lg N(\text{H}) = 12$, для моделі атмосфери $T_{\text{ef}} = 5930 \text{ K}$, $\lg g = 1.0$, $V_{\text{mic}} = 6 \text{ км/с}$. При ефективній температурі $T_{\text{ef}} = 6250 \text{ K}$ ми отримали $\lg N(\text{Ac}) = -1.0$.

Ключові слова: вміст елементів, еволюція зір, зоря: HIP13962, цефеїди, радіоактивні ізотопи.

ВСТУП

Про проблему появи актинію в атмосферах цефеїд. Цефеїди — пульсуючі жовті надгіганти — важлива і не до кінця зрозуміла фаза зоряної еволюції. Ці зорі з'являються після виходу з головної послідовності, після стадії горіння водню в центрі зорі і стають пульсуючими об'єктами, попадаючи у полосу нестабільності на діаграмі Г-Р [5]. Невідомо, який їхній еволюційний шлях на стадії головної послідовності та яким чином вони перетворюються на пульсуючі зорі. Згідно з роботою [18] цефеїди — це молоді об'єкти від десяти до кілька сотень мільйонів років. Їхні маси становлять 4...10 мас Сонця [5]. Характеризуючи основні властивості цефеїд, Енгл [5] розглядає таку проблему появи емісійних ліній в області Ca II по спостереженнях цефеїд, вказуючи на роботу Крафта 1957 р. [15]. В цій роботі Крафт дослідив спектри більш ніж 20 яскравих цефеїд в області емісійних ліній Ca II H 396.85 нм і K 393.37 нм. На основі цього матеріалу він прийшов до висновку, що на фазах 0.8...1.0 емісійні лінії спостерігаються найбільш сильними при найменшому радіусі цефеїд та з максимальною світністю, тобто вони чітко пов'язані з механізмом змінності цефеїд [5, 15]. Крафт приходить до висновку, що розвиток емісії на проміжку періоду в дублеті кальцію H і K у класичних цефеїдах асоціюється з появою гарячої матерії в атмосфері. Цю фазу деякий час називали фазою поршня [5]. Тобто, емісія, характерна для сильних ліній, якими є лінії Ca II H&K, була наслідком росту температури в нижній частині атмосфери на певних проміжках часу. Знайдена нами кореляція появи емісійних компонентів сильних ліній у спектрах зір з появою ліній радіоактивних елементів, зокрема актинію, у спектрах зір в галактиках з різною історією збагачення, як-то в нашій Галактиці (HD101065, [2]), карликовій галактиці Форнакс (BL138) [11], Великій Магеллановій Хмарі (RM_1-667) [9], можуть бути дійсно пов'язані з «гарячою матерією в нижній частині атмосфери», що є важливим для розуміння процесів, які проходять в нестабільних атмосферах.

Історія дослідження run-away stars і цефеїди HIP13962. Згідно з роботою Тецлафа та ін. [22], HIP 13962 є зоря-утікач (а run-away star), яка у минулому була компонентом подвійної системи. Автори стверджують, що в результаті вибуху 3 млн років тому наднової II типу, яка до того була більш масивним бінарним партнером з HIP 13962, сама HIP 13962 розбіглась з новоутвореним залишком наднової II типу,

Таблиця 1. Хімічний склад HIP13962 [27, 28]

z	Іон	$\lg N$		n
26	Fe I	-0.07	0.17	80
	Fe II	-0.05	0.18	18
29	Cu I	-0.52	0.12	3
39	Y II	0.39	0.22	10
40	Zr II	0.28		1
46	Pd I	0.44		1
57	La II	0.61	0.17	16
58	Ce II	0.34	0.19	19
59	Pr II	0.28	0.23	10
60	Nd II	0.39	0.23	50
62	Sm II	0.08	0.19	15
63	Eu II	0.30		1
64	Gd II	-0.10	0.24	4
65	Tb II	-0.36	0.04	3
66	Dy II	0.15	0.09	3
68	Er II	0.01	0.21	4
82	Pb II	0.23		1

пульсаром PSRJ0826+2637 зі скупчення Stock7. Довести бінарну природу HIP 13962 у минулому можна у випадку, якщо її атмосфера забруднена важкими елементами у процесі акреції після вибуху наднової збагаченою речовиною в результаті нуклеосинтезу. Згідно з сучасною теорією еволюції зір та хімічних елементів при вибуху компонента подвійної системи, масивнішого, ніж HIP 13962 з масою $12M_{\odot}$ [22], мають спостерігатись надлишки легших елементів нейтронного захвату. Ми детально дослідили лінії поглинання (табл. 1) та емісійні лінії у спектрі HIP 13962 в роботах Юценка та ін. [27, 28].

Використовувались спектри HIP 13962, які спостерігались в 2014 році на Бохунсанській оптичній астрономічній обсерваторії (ВОО) за допомогою 1.8-м телескопа зі спектральною роздільною здатністю $R = 80000$. Відношення сигналу до шуму для всіх спектральних спостережень перевищує 100 в центрі ешеле-порядків. Спектри були отримані в діапазоні довжин хвиль $\lambda = 378.0 \dots 887.7$ нм. При спостереженнях 2014 р. значна увага приділялась якісній редукції синьої області спектру, де розташовані найбільш сильні лінії актинію та інших ліній важких елементів. Початкову редукцію спектрів ВОО виконано при допомозі стандартного пакету програм IRAF. Фінальну роботу з обробки спектрів було виконано за допомогою програми URAN [26]. Ця частина роботи включає порівняння спектрів досліджуваної зорі зі спектрами зір з близькими параметрами атмосфер, які добре досліджені, для яких є високодисперсійний спектральний матеріал та одночасно порівняння спектрів досліджуваної зорі з синтетичним спектром зорі. Оцінка параметрів моделі атмосфери HIP 13962 спочатку виконувалась з використанням сітки моделей атмосфер Кастеллі та Куруца (2003) [4] та спектрального матеріалу як ВОО, так і найкра-

щик архівних спектрів. З використанням неблендованих ліній поглинання заліза були отримані такі значення ефективної температури, прискорення вільного падіння та мікротурбулентної швидкості: $T_{\text{ef}} = 5930 \text{ K}$, $\lg g = 1.0$, $V_{\text{mic}} = 6 \text{ км/с}$. Атмосфера зорі незначно збагачена елементами першого піку нейтронного захвату (Y, Zr) і легкими лантаноїдами другого піку нейтронного захвату (табл. 1). Виявлено незначний надлишок свинцю, як бачимо в табл. 1, згідно з [27, 28].

Таким чином, бінарна гіпотеза про входження HIP 13962 до складу подвійної системи у минулому не виключається, якщо брати до уваги хімічний склад атмосфери зорі. Зауважимо, що синтез елементів з масами $A \approx 120$ для таких елементів, як Sr, Y або Zr проходить в реакціях слабкого r-процесу. Згідно з роботою Ванайо та ін. [25] найбільш перспективним місцем протікання r-процесу є нейтринні вітри, в яких вільні нуклони (протони і нейтрони) прискорюються інтенсивним нейтринним потоком біля сфери із нейтрино навколо колапсуючої наднової і об'єднуються з важкими ядрами.

ДОСЛІДЖЕННЯ ЛІНІЙ ПОГЛИНАННЯ АКТИНІЮ У СПЕКТРІ HIP 13962

Сильні лінії у спектрі HIP 13962, такі як лінії водню та дублету натрію, мають деформовані профілі, включаючи емісійні складові. Згідно з роботою [9] в цьому випадку варто провести пошук та дослідження ліній поглинання актинію. З іншого боку, згідно з висловленою гіпотезою [1, 8, 10] вплив нейтронної зорі (раннього пульсара) на зорю, яка є у парі з ним, може призвести до утворення радіоактивних елементів, які були ідентифіковані у спектрі зорі Пшибильського [1, 8, 10]. Для HIP 13962, яка ще 3 млн років тому була компонентом подвійної з пульсаром, це незначний проміжок часу у масштабах життя зір.

Для спектрів за увесь період дат спостережень характерні емісійні лінії деяких елементів. Порівняння ліній водню H і H з синтетичним спектром показало значну зміну деформації їхніх профілів з часом. У короткохвильовому крилі лінії H спостерігається емісійний компонент в архівних спектрах ELODI за 1995 р. На рис. 1 для лінії Na I D₂ бачимо чіткий емісійний компонент на всіх наявних спектрах 1995... 2014 рр.; глибина ліній змінювалась. Загалом структура лінії складна. Окрім цього, спостерігаються емісійні лінії у спектрах зорі HIP 13962 за різні роки, особливо в короткохвильовій частині спектру, які не ідентифіковані нами, на відміну від емісійної лінії радіоактивного елементу прометію [27, 28] на довжині хвилі $\lambda = 555.688 \text{ нм}$, яка, проте, не є сильною. В цілому для зорі HIP 13962 спостерігаються значні варіації спектральної картини [27, 28]. Спектри 2003 і 2005 років відрізняються від інших меншою глибиною ліній на всьому інтервалі спостережних спектрів.

В нашій роботі досліджено лінії актинію в діапазоні довжин хвиль $\lambda = 378.0...887.7 \text{ нм}$, що дозволило ідентифікувати більш сильні лінії

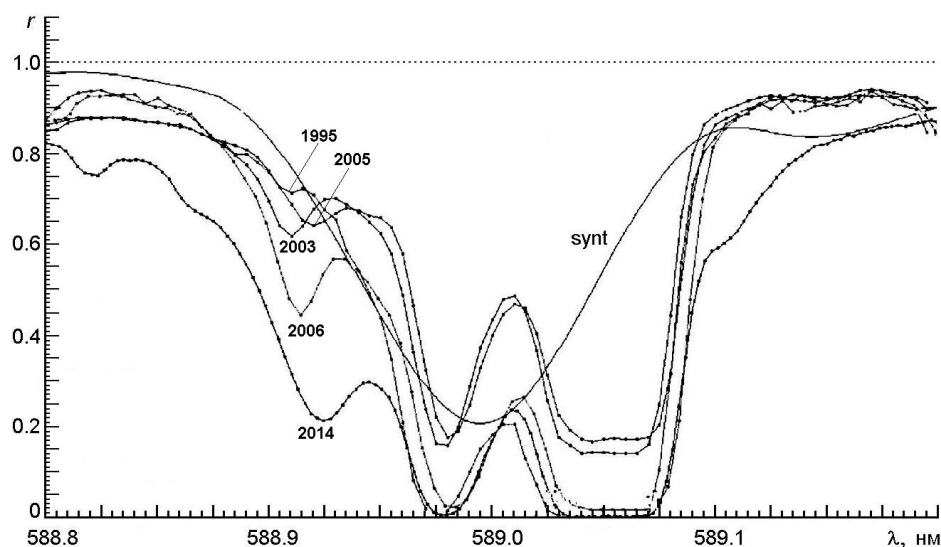


Рис. 1. Лінія резонансного дублету натрію Na I D₂ 588.995 нм у спектрі HIP 13962. Точки — спостережні спектри (цифрами вказано роки спостережень), суцільна лінія synt — синтетичний спектр

поглинання актинію, спектроскопічні дані для яких були взяті з роботи [19]. Вміст актинію для індивідуальних ліній, використовуючи спектральний матеріал зорі HIP13962 за 1995 і 2014 роки, був отриманий як за допомогою програми Куруча WIDTH9 (табл. 2) з використанням еквівалентних ширин, так і методом синтетичного спектру. Для розрахунку синтетичних спектрів в рамках класичних наближень (ЛТР, плоскопаралельна модель атмосфери та ін.) використовувалась програма WITA618 [16]. Використовувались списки атомних ліній VALD3 [21], профілі коефіцієнтів поглинання в частотах всіх ліній визначались функцією Фойгта, сталі розширення брались із VALD3 або, при їхній відсутності, розраховувались в рамках наближень Ун-зольда [23]. Сили осциляторів ліній взято з роботи Кюне та ін. [19].

У табл. 2 дається результат дослідження чотирьох ліній актинію у спектрі зорі HIP13962. Використовуючи архівний матеріал, отриманий на обсерваторії От-Прованс (ELODIE) за 1995 р., при використанні значень модельних параметрів $T_{\text{ef}} = 5930$ К, $\lg g = 1.0$, $V_{\text{mic}} = 6.00$ км/с ми отримали вміст актинію $\lg N(\text{Ac}) = -13.15$. Результат отримано методом моделей атмосфер з використанням еквівалентних ширин за допомогою програми Куруча WIDTH9 (табл. 1, 2). Ідентифікація спектральних ліній у спостережному спектрі HIP13962 виконувалась на основі порівняння синтетичного спектру, розрахованого для всього діапазону спостережного спектру, беручи до уваги хімічний склад атмосфери, отриманий в роботах Юценка та ін. [27, 28]. Еквівалентні ширини для спектрів HIP13962, отриманих в 2014 і 1995 рр., визначались відносно локального континууму. У табл. 2 даються також середні значення вмісту актинію. Перший метод визначення вмісту актинію дає уявлення про те, які величини еквівалентних

Таблиця 2. Вміст Ас II в атмосфері зорі HIP 13962 у 1995 та 2014 рр.

λ , нм	Z	EW, нм	lggf	E_{low} , eB	lgN(Ac) 5930/1.0/6.0 WIDTH-9	lgN(Ac) 5930/1.0/6.0 SYNT	lgN(Ac) 6250/1.0/6.0 SYNT
<u>1995 р.</u>							
450.720	89.01	0.87	-1.04	0.00	-1.075		
616.475	89.01	0.34	-0.85	0.588	-1.233		
Середнє за 1995 р.					-1.15		
<u>2014 р.</u>							
416.840	89.01	0.57	-0.46	0.653	-1.167	-1.10	
450.720	89.01	0.72	-1.04	0.00	-1.159	-1.20	-1.00
591.085	89.01		-0.60	0.653		-1.30	
Середнє за 2014 р.					-1.16	-1.20	-1.00

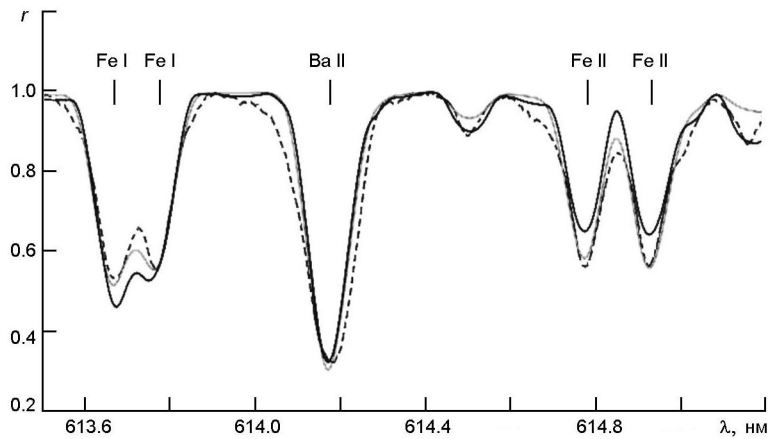


Рис. 2. Спостережуваний спектр HIP 13962, отриманий у 2014 р. (штрихова лінія) та синтетичні спектри для моделей атмосфери $T_{\text{ef}} = 5870$ К, $\text{lg}g = 1.2$ (суцільна чорна лінія, $\text{Fe} = -4.34$) та $T_{\text{ef}} = 6250$ К, $\text{lg}g = 1.0$, $V_{\text{mic}} = 6$ км/с (суцільна сіра лінія, $\text{Fe} = -4.54$)

ширин досліджуються. Метод синтетичного спектру дозволяє визначити, наскільки та чи інша лінія чутлива до кількісного значення вмісту елементу. На рис. 2 дається порівняння синтетичного спектру, розрахованого для моделі атмосфери зорі HIP13962, зі спостережним в залежності від вмісту актинію ($\text{lg}N(\text{Ac}) = -12.5, -13.0$ і -13.5) для лінії поглинання Ас II 450.720 нм. Ця лінія чутлива до вмісту актинію.

Поява актинію в атмосфері цефеїди HIP 13962 має важливе значення для розуміння появи самого класу змінних зір — цефеїд. Наразі теоретичні розрахунки, виконані Горіелі [12], вказують на можливі фізичні акреційні процеси, в результаті яких можуть появитися такі радіоактивні елементи з коротким періодом піврозпаду. Цей процес акреції повинен підтримуватись в часі на певних проміжках періоду цефеїди. Це повністю підтверджує висновки роботи [15] про появу гарячої матерії в нижній частині атмосфери. Як зазначили Енгл зі співробітниками [5, 6, 13], є проблема в розумінні процесів, які притаманні цефеїдам: “незважаючи на те, що для деяких зоряних об’єктів зібрано

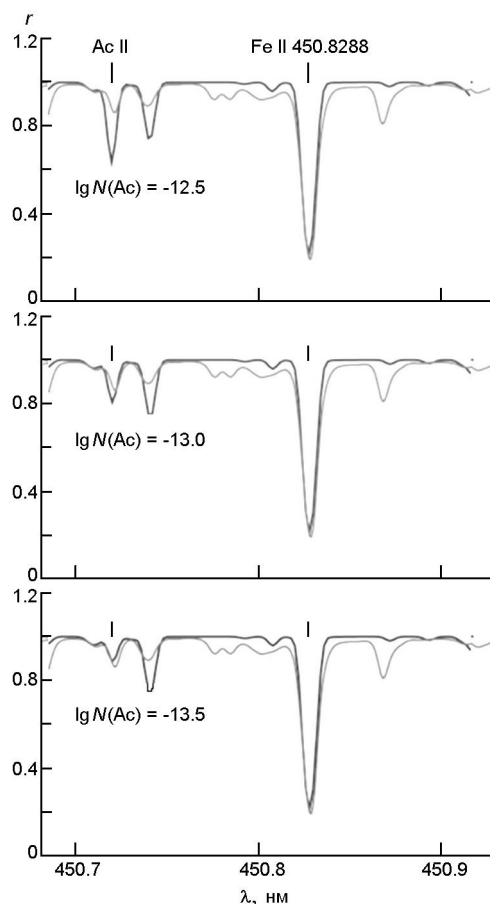


Рис. 3. Синтетичні спектри HIP 13962 поблизу лінії поглинання актинію 450.720 нм ($W = 0.72$ нм), отримані для різних значень вмісту елементу. Параметри моделі атмосфери $T_{\text{ef}} = 5930$ К, $\lg g = 1$, $V_{\text{mic}} = 6$ км/с

спостереження за більш ніж 100 років, цефеїди залишаються все ж складними і астрофізично інтригуючими з точки зору атмосферної енергетики”.

Як і літій, який має ключове значення для розуміння явища магнітно-пекулярних зір, актиній може зіграти важливу роль для розуміння появи класу цефеїд. Розглядаючи спектри цефеїд Магелланових Хмар, для деяких з них отримуємо аналогічні результати.

Уточнення параметрів атмосфери. У першому наближенні ми використали значення параметрів атмосфери $T_{\text{ef}} = 5871 \pm 130$ К, $\lg g = 1.2$, $V_{\text{mic}} = 11.5$ км/с, отримані В. В. Ковтюхом в роботі Тецлафа та ін. [22]. Розрахований з ними синтетичний спектр дозволив ідентифікувати лінії поглинання заліза, вільні від вкладу інших елементів, та отримати значення параметрів зорі, які виявилися близькими до попередніх значень: $T_{\text{ef}} = 5930$ К, $\lg g = 1$, $V_{\text{mic}} = 6$ км/с. На основі нових значень ми отримали хімічний склад атмосфери, використовуючи програму Куруца WIDTH-9 [27, 28]. Але синтетичний спектр, розрахований в діапазоні $\lambda = 413.6 \dots 415.0$ нм з визначеним вмістом хіміч-

ного складу, краще описує спостережний спектр 2014 р. в районі ліній нейтрального та іонізованого заліза при $T_{\text{еф}} = 6250$ К (рис. 2). При збільшеній температурі $T_{\text{еф}} = 6250$ К вміст актинію змінився незначно, $\lg N(\text{Ac}) = -13.00$ dex, у межах похибок (± 0.5 dex).

На кожній ітерації розрахунків використовувались розраховані індивідуальні моделі зорі [17]. На рис. 3 даються синтетичні спектри, розраховані при різних значеннях вмісту, які показують, що вибрана лінія 450.720 нм дійсно чутлива до зміни вмісту актинію. В цих розрахунках використовувались нові атомні дані, зокрема перший потенціал іонізації для актинію [19] та статистичні суми [20].

Результати дослідження вмісту актинію в атмосфері HIP 13962 у 1995 та 2014 рр. подаються у табл. 2 для індивідуальних ліній в рамках різних моделей. Тут W — еквівалентні ширини, $\lg gf$ — сили осциляторів іонізованого актинію, взяті із роботи [19], E_{low} — енергія нижнього рівня; вміст актинію $\lg N(\text{Ac})$ — у шкалі водню $\lg N(\text{H}) = 12$.

ВИСНОВКИ ТА ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ

Актиній є третім елементом, поряд з торієм та ураном, який належить до групи актиноїдів і який досліджується в атмосферах зір. Нагадаємо, що актиній — радіоактивний елемент, у якого ізотоп з найбільшим періодом піврозпаду становить всього 21.772(3) роки, утворюється при розпаді радіоактивного ряду урану ^{235}U . Лінії поглинання актинію на довжинах хвиль 591.085 нм і 616.475 нм, ототожнені у спектрах червоного надгіганта RM_1-667, що належить Великій Магеллановій Хмарі [9] та у спектрі червоного гіганта BL138 [11], що належить сфероїдальній карликовій галактиці Форнакс, мають аномальний профіль водню і (або) інших сильних ліній. Дослідження ліній актинію в оптичній області спектру зір RM_1-667 та BL138 (Форнакс), які не належать до найсильніших, спонукало нас звернутися до ліній актинію у короткохвильовій частині спектру, де, згідно з лабораторними дослідженнями, лінії актинію є більш інтенсивними. Згідно з роботою [19] лінії актинію в короткохвильовій частині спектру мають відносну інтенсивність порядку 700 (416.840 і 450.720 нм), на відміну від ліній у видимій області спектру 598.985 і 614.675 нм, які в лабораторних умовах мають інтенсивності порядку 300 і 200 (максимальна інтенсивність 1000).

Таким чином, в отриманих спектрах HIP 13962 за 2014 рік ми ідентифікували лінії іонізованого актинію в синій області спектру (598.985 і 614.675 нм). Цей результат підтверджується дослідженням спектру зорі за 1995 рік, який показує емісійну складову в крилі лінії H. Вперше у спектрах цефеїди ідентифіковано лінії поглинання іонізованого актинію. Для ідентифікації використовувались синтетичні спектри, відбирались для аналізу лінії, вільні від вкладу інших еле-

ментів і чутливі до зміни хімічного складу актинію, що видно із рисунків.

Ми визначили вміст актинію ($\lg N(\text{Ac}) = -1.20$) в атмосфері цефеїди HIP 13962, який не відрізняється значно від вмісту цього елемента в атмосфері червоного надгіганта RM_1-667 Великих Магелланових Хмар ($\lg N(\text{Ac}) = -1.30$ [8]) і в атмосфері червоного гіганта BL138 ($\lg N(\text{Ac}) = -1.60$ [11]). Але в атмосфері зорі Пшибильського вміст актинію більш ніж на два порядки вищий: $\lg N(\text{Ac}) = 0.94 \pm 0.09$ в шкалі $\lg N(\text{H}) = 12$ [2]. Задля порівняння самого значення актинію в абсолютній шкалі $\lg N(\text{Ac}) = -1.20$ для HIP13962 приведемо значення вмісту торію і урану як актиноїдів для атмосфери Арктура: $\lg N(\text{Th}) = -0.35$ і $\lg N(\text{U}) = -1.05$ у шкалі водню $\lg N(\text{H}) = 12$ при дефіциті заліза $\lg N(\text{Ac}) = -0.58$ [7]. В атмосфері Сонця $\lg N(\text{Th}) = 0.02 \pm 0.10$, а у метеоритній речовині $\lg N(\text{U}) = -0.54 \pm 0.20$ при $\lg N(\text{H}) = 12.0$ [3]. В роботі Ющенко [2] приведено значення $\lg N(\text{Th}) = -1.50$ для атмосфери зорі гало HD 221170 і $\lg N(\text{U}) < -2.02 \pm 0.20$. Для цієї зорі по спектральному матеріалу, який було отримано на 10-м та 2.7-м телескопах, в роботі [14] отримано вміст торію $\lg N(\text{Th}) = -1.48 \pm 0.05$.

REFERENCES

1. Gopka V. F., Ulyanov O. M. (2008) About the hypothesis explaining the phenomenon of Przybylski's star. *Izvestiya Crimean. Astrophys. Observ.* 104(2). 225—226.
2. Yushchenko A. V. (2017) Heavy elements in the atmospheres of peculiar stars. PhD (Phys. and Math.). Odesa. (In Ukrainian).
3. Asplund M., Grevesse N., Sauval A., Scott P. (2003) The chemical composition of the Sun. *Annu. Rev. Astron. and Astrophys.* 2009. 47. 481—522.
4. Castelli F., Kurucz R. L. (2003) New grids of ATLAS9 model atmospheres. *Proc. 210-th Symp. IAU Modelling of Stellar Atmospheres*. Uppsala, Sweden, Eds N. Piskunov, W. W. Weiss, D. F. Gray. posterA20.
5. Engle S. C. (2014) *The secret lives of Cepheids. A multi-wavelength study of the atmospheres and real-time evolution of classical Cepheids*. PhD (Phys). James Cook Univ., Australia.
6. Engle S., Guinan E., Heintz W., Carton J., Hernandez A. (2005) The secret lives of Cepheids II: More surprises as we extend the period/luminosity range of our sample. *Bull. Amer. Astron. Soc.* 37. 1169.
7. Gopka V. F., Yushchenko A. V., Shavrina A. V., Perekhod A. V. (1999) Thorium and Uranium in the atmosphere of Arcturus. *Kinematics and Phys. Celestial Bodies*. 15(5). 332—337.
8. Gopka V., Ulyanov O., Andrievsky S. (2008) Neutron stars as a source of the short-lived nuclides in Ap-stars. OMEG07: The 10-th Inter. Symp. on Origin of Matter and Evolution of Galaxies: From the Dawn of Universe to the Formation of Solar System. *Amer. Inst. Phys. Conf. Ser. Japan*. 1016. 460—462.
9. Gopka V. F., Shavrina A. V., Yushchenko V. A., Yushchenko A. V., Pavlenko Ya. V., et al. (2018) Actinium abundance in the atmospheres of three red supergiants in the Magellanic Clouds. *Kinematics and Phys. Celestial Bodies*. 34. 123—133.
10. Gopka V. F., Ulyanov O. M., Yushchenko A. V., Shavrina A. V., Andrievsky S. M. (2010) The nature of magnetic chemically peculiar stars through the prism of inexplicable facts. OMEG10: Origin of matter and evolution of Galaxies. *Amer. Inst. Phys. Conf. Ser.* Eds Tanihara I. et al. — RCNP. Japan. 1269. 454—455.

11. Gopka V. F., Yushchenko A. V., Yushchenko V. A., Shavrina A. V., Andrievsky S. M., Jeong Y., Shereta E. P. (2018) The abundances of heavy elements in BL138 — red giant of local group Fornax dwarf spheroidal galaxy. *Phys. Sci. and Technol.* 5(1). ISSN2409-6121. 70—78.
12. Goriely S. (2007) Nucleosynthesis by accelerated particles to account for the surface composition of HD101065 (Przybylski's star). *Astron. and Astrophys.* 466(1). 619—631.
13. Guinan E., Engle S., Evans N., Harper G., Harp G. M. (2007) *The secret IR lives of Cepheids: Spitzer IR spectroscopy of circumstellar envelopes, winds and chromospheric emissions in nearby Cepheids.* Spitzer Proposal ID 40968 May 2007.
14. Ivans I. I., Simmerer J., Sneden C., Cowan J. J., Gallino R., Bisterzo S. (2006) Lawler near-ultraviolet observations of HD221170: New insights into the nature of r-process-rich stars. *Astrophys. J.* 645(1). 613—633.
15. Kraft R. P. (1957) C II emission in classical Cepheid variables. *Astrophys. J.* 125. 336—349.
16. Pavlenko Ya. V. (1997) A “lithium test” and modeling of lithium lines in late-type M dwarfs: Teide1. *Astron. Repts.* 41. 537—542.
17. Pavlenko Ya. V. (2003) Model atmospheres of red giants. *Astron. Repts.* 47. 59—67.
18. Proxauf B., da Silva R., Kovtyukh V. V., et al. (2018) A new and homogeneous metallicity scale for Galactic metallicity scale for Galactic classical Cepheids. I. Physical parameters. *Astron. and Astrophys.* 616. 82—95.
19. Quinet P., Argante C., Fivet V., Terranova C., Yushchenko A. V., Biémont É. (2007) Atomic data for radioactive elements Ra I, Ra II, Ac I and Ac II and application to their detection in HD 101065 and HR 465. *Astron. and Astrophys.* 474. 307—314.
20. Roßnagel J., Raeder S., Hakimi A., Ferrer R., Trautmann N., Wendt K. (2012) Determination of the first ionization potential of actinium. *Phys. Rev. Astron. and Astrophys.* 85. 125—150.
21. Ryabchikova T. A., Pakhomov Yu. V., Piskunov N. E. (2011) New release of Vienna atomic line database (VALD-3) and its integration in virtual atomic and molecular data centre (VAMDC). *Uchenye zapiski Kazanskogo universiteta.* 153(2). 61—66.
22. Tetzlaff N., Dincel B., Neuhauser R., Kovtyukh V. V. (2014) The origin of the young PSRJ0826 +2637 and possible former companion HIP 13962. *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 438. 3587—3593.
23. Unsold A. (1955) *Physik der Sternatmosphären, MIT besonderer Berücksichtigung der Sonne.* <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1955psmb.book....U>
24. Urer G., Ozdemir L. (2012) The level structure of singly-ionized actinium. *J. Korean Phys. Soc.* 61. 353—358.
25. Wanajo S., Itoh N., Ishimaru Y., Nozawa Y., Beers T. (2002) The r-process in the neutrino wind of core-collapse supernova and U-Th cosmochronology. *Astrophys. J.* 577. 853—865.
26. Yushchenko A. V. (1998) *URAN: a software system for the analysis of stellar spectra.* Proc. 20th Stellar Conf. Czech and Slovak Astron. Inst. (5-7 November, 1997, Brno, Czech Republic). Ed. J. Dusek. ISBN 80-85882-08-6.
27. Yushchenko V., Yushchenko A., Gopka V., Shavrina A., Kovtyukh V., Hong K. S., Mkrtichian D. I. (2016) *HIP 13962 — The possible former member of binary system with supernova.* Presentation at the Conf. Stars on the run — a meeting on the run away and hyper-velocity stars. (16—19, August, Bamberg, Germany). URL: <http://www.blackhole.eu/media/hvs2016/PDFs/Yushchenko.pdf>.
28. Yushchenko V., Yushchenko A., Gopka V., Shavrina A., Kovtyukh V., Hong K. S., Mkrtichian D. (2016) HIP 13962 — The possible former member of binary system with supernova. *Odessa Astron. Publs.* 29. 229—232. DOI: <http://dx.doi.org/10.18524/1810-4215.2016.29.8523>

V. F. Gopka¹, A. V. Shavrina², V. A. Yushchenko^{2,4},
Ya. V. Pavlenko², A. V. Yushchenko³, L. V. Glazunova⁵

¹Scientific Research Institute “Astronomical Observatory”
of I. I. Mechnikov Odesa National University, Odesa, Ukraine

²Main Astronomical Observatory of the National Academy of Sciences of Ukraine,
Kyiv, Ukraine

³Astrocamp Contents Research Institute, Goyang, Republic of Korea

⁴Odesa Maritime University, Odesa, Ukraine

⁵Odesa National Academy of Telecommunications, Odesa, Ukraine

ANALYSIS OF ACTINIUM ABUNDANCES IN THE ATMOSPHERE OF CEPHEID HIP13962

Actinium is radioactive element, which has an isotope ²²⁷Ac with the longest half-live of 21.772(3) years. It is the third element of a group of actinoids, abundance of which can be studied in the atmospheres of stars. Its presence in the atmosphere of a particular star primarily indicates some mechanism in which it is produced. The first studies of the absorption lines of actinium in the spectra of certain stars showed that the appearance of actinium in their spectrum is associated with the presence of deformation of strong lines, in some cases with emission components. To search for absorption lines of actinium in the spectra of stars we attracted attention to such class of stars as Cepheids, which are characterized by deformation of strong lines due to pulsations. The absorption lines of actinium were studied in the spectral interval of 378.0...887.7 nm for the runaway star and Cepheid HIP13962 using the spectra, obtained in 2014 with a 1.8-meter telescope at Bohunsan Optical Astronomical Observatory (BOAO, South Korea) with a spectral resolution greater than $R = 80,000$. Using the archived HIP 13962 spectrum for 1995 in the wavelength range of 400.0...680.0 nm with a spectral resolution of $R = 42,000$, which obtained with the 1.93-m telescope of the Haute Provence observatory (France). The modelling are shown that the abundance of actinium in the atmosphere of HIP 13962 $\log N(\text{Ac}) = -1.2$ on the scale $\log N(\text{H}) = 12.0$, when using the model atmosphere with $T_{\text{eff}} = 5930$ K, $\log g = 1.0$, $V_{\text{micro}} = 6$ km/s. This value turns out to be 0.2 more at an increase in the effective temperature $T_{\text{eff}} = 6250$ K: $\log N(\text{Ac}) = -1.0$ on the hydrogen scales $\log N(\text{H}) = 12.0$.

Keywords: abundances, stellar evolution, star: HIP 13962, Cepheids, radioactive isotopes.

Стаття надійшла до редакції 05.09.2021

Після доопрацювання 12.11.2021

Прийнята до друку 16.12.2021