

УДК 524.314-355

**В. Ф. Гопка<sup>1</sup>, А. В. Шаврина<sup>2</sup>, В. А. Ющенко<sup>1</sup>, А. В. Ющенко<sup>3</sup>,  
Я. В. Павленко<sup>2</sup>, С. М. Андриевский<sup>1</sup>, С. В. Васильева<sup>1</sup>,  
Ч. Ким<sup>4</sup>, Й. Джеонг<sup>5</sup>, Ю. П. Любчик<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Научно-исследовательский институт «Астрономическая обсерватория»  
Одесского национального университета имени И. И. Мечникова  
ул. Маразлиевская 1 в, Одесса, Украина, 65014  
vfgopka@ukr.net, vladimiryushchenko@gmail.com,  
cerera.sveta@rambler.ru, andrievskii@ukr.net

<sup>2</sup>Главная астрономическая обсерватория НАН Украины, Киев, 03143, Украина  
ул. Академика Заболотного 27, Киев, 03143  
shavrina@mao.kiev.ua, ur@mao.kiev.ua, lyu@mao.kiev.ua

<sup>3</sup>Исследовательский институт Астрокамп Контентс, Гойанг, 10-329, Республика Корея  
avyushchenko@gmail.com

<sup>4</sup>Чонгбукский национальный университет, Чунджу, 561-756, Республика Корея  
sek@sejong.edu

<sup>5</sup>Сейджон университет, Сеул, 05-006, Республика Корея  
yeuncheoljeong@sejong.ac.kr

## Содержание актиния в атмосферах трех красных сверхгигантов Магеллановых Облаков

*Проведен анализ содержания актиния в атмосферах двух красных сверхгигантов, PMMR23 и PMMR144, в Малом Магеллановом Облаке и в атмосфере сверхгиганта RM\_1-667, принадлежащего Большому Магеллановому Облаку. Использовались спектральные наблюдения, полученные на 3.6-м телескопе Европейской Южной обсерватории с разрешением  $R = 30000$ . В атмосферах PMMR23 и PMMR144 астиний не обнаружен. Оценены лишь верхние пределы его содержания:  $\lg N(\text{Ac}/\text{H}) = -15.1$  и  $-15.0$  соответственно. Для RM\_1-667 содержание актиния составляет  $\lg N(\text{Ac}/\text{H}) = -14.1 \dots -13.3$  в зависимости от принимаемых параметров модели атмосферы. Для анализа использовались линии ионизованного актиния 616.475 нм и 581.085 нм.*

**Ключевые слова:** галактики ММО, БМО, звезды поздних типов, PMMR23, PMMR144, RM\_1-667, ядерные реакции, нуклеосинтез, содержания химических элементов, астиний.

**ВСТУПЛЕНИЕ**

Сравнительный анализ химического состава атмосфер сверхгигантов нашей Галактики и ближайших к ней галактик Малого и Большого Магеллановых Облаков (ММО, БМО) показывает явные различия содержаний  $[E/Fe]$  тяжелых элементов в них. Для сверхгигантов ММО наблюдаются избытки элементов нейтронного захвата [11], если сравнивать с соответствующими значениями для солнечной атмосферы, начиная с атомного номера  $Z = 56$ . Идентификация линий, принадлежащих элементам третьего пика нейтронного захвата в их спектрах, а также обнаруженные избытки содержания этих элементов [8] свидетельствуют о более эффективном производстве тяжелых элементов в соседних галактиках, в результате чего синтезируются элементы основной составляющей  $r$ -процесса. Подтверждением этому являются обнаруженные в спектрах сверхгигантов Магеллановых Облаков линии тория, элемента, возникающего в результате  $r$ -процесса [6]. Так как торий и актиний связаны между собой как при синтезе, так и при распаде изотопов уранового ряда, то имеет смысл предпринять поиск линий актиния в спектрах звезд, содержащих торий и оценить содержание  $Ac$  ( $Z = 89$ ) или его верхний предел в атмосферах звезд, имеющих избыток тория. Отметим, что содержание актиния в звездных атмосферах ранее не определялось.

Элемент под номером 89 был открыт в 1899 г. А. Деберьеном, учеником Пьера и Марии Кюри, при изучении урановых отходов. Элемент принадлежит к семейству урана  $^{235}U$  [4]. Самый долгоживущий изотоп  $^{227}Ac$ , имеющий период полураспада 21.772 года [5], входит в число редчайших элементов Земли, находясь в мизерных количествах в ториевых и урановых рудах. Изотоп  $^{227}Ac$  в результате  $\alpha$ -распада превращается в изотоп  $^{227}Th$  с вероятностью 98.61 %. С малой долей вероятности происходит  $\beta$ -распад  $^{227}Ac$  с образованием франция. По имени актиния назван целый ряд химических элементов, имеющих атомные номера от 89 до 103 (актиноиды). Актиний используется как источник нейтронов в ядерных реакторах. Это — один из почти не изученных элементов в астрофизике. В 2004 г. В. Ф. Гопкой и др. было обнаружено, что в спектре пекулярной звезды Пшибыльского (HD 101065) некоторые из неидентифицированных линий соответствуют длинам волн радиоактивных элементов с атомными номерами  $Z > 82$ , среди них есть и линии, возможно принадлежащие нейтральному, ионизованному и дважды ионизованному актинию [9, 10]. Напомним, что звезда Пшибыльского известна тем, что в ее спектре наблюдается очень большое количество линий, не поддающихся идентификации.

В 2007 г. были опубликованы суммы по состояниям и силы осцилляторов для линий нейтрального и однократно ионизованного атома актиния [18], в 2012 г. опубликованы силы осцилляторов для актиния  $Ac$  II [24]. Экспериментальное значение потенциала ионизации нейтрального актиния, равное 5.38 эВ, было найдено в 2012 г. [19]. Нами

выполнен поиск линий актиния в спектрах некоторых сверхгигантов Малого и Большого Магеллановых Облаков и определение химического содержания этого элемента. Немаловажным стимулом предпринятой попытки поиска линий актиния был и обнаруженный нами факт, что сверхгиганты, принадлежащие группе высокоскоростных звезд (H-звезды), имеют в профиле линии водорода H симметричные эмиссионные компоненты. А это означает, что в области повышенной скорости газа и звезд для ММО есть направленный поток вещества, падающего на поверхностные слои сверхгигантов и модифицирующие температуру более глубоких слоев. Это соответствует эмпирически модифицированным моделям [26], у которых более глубокие слои атмосферы звезды имеют меньшую температуру по сравнению с вышележащими (инверсия температур). Сверхгигант PMMR23, принадлежащий к группе низкоскоростных звезд, не показывает эмиссионных компонентов. Но более интересным фактом при исследовании линий актиния в спектрах звездных атмосфер явилось то, что линии актиния идентифицируются в таких спектрах звезд, в которых наблюдается асимметрия профилей линий водорода H и (или) эмиссионные компоненты линий водорода. Одно из предположений, которое может объяснить происхождение актиния в атмосфере той или иной звезды — это аккреция высокоэнергетических частиц на эту звезду, модифицирующих верхние слои атмосферы, в которых и формируются сильные линии. Возникновение потока падающей материи на звезду может быть результатом разных эволюционных сценариев.

#### **ОБ ЭФФЕКТИВНОСТИ r-ПРОЦЕССА В МАЛОМ И БОЛЬШОМ МАГЕЛЛАНОВЫХ ОБЛАКАХ**

Еще в конце 1980-х гг. в результате детального спектроскопического анализа в атмосферах сверхгигантов Малого и Большого Магеллановых Облаков был обнаружен избыток тяжелых элементов [20, 22]. Позже было установлено, что быстро эволюционирующие звезды, какими являются сверхгиганты с массами более десяти солнечных масс, имеют избыточное содержание элементов с атомным номером более 56 [11], вплоть до элементов третьего пика нейтронного захвата (Os, Ir, Pt,  $Z = 76, 77, 78$ ) [8] и тория ( $Z = 90$ ) [6], элемента, образованного в результате r-процесса. В спектрах Магеллановых Облаков при сравнении со спектрами Арктур и HD221170 линии элементов с преобладающим вкладом r-процесса заметно усилены (Th и Nd), что можно видеть на рис. 1а линии Ti и Fe сопоставимы по интенсивности. Линия тория  $598.9045$  нм вносит заметный вклад в близлежащую линию неодима  $598.9378$  нм (в большем масштабе дается в работе [6]). Видно, что максимальная интенсивность линии тория наблюдается для PMMR144 (эквивалентная ширина  $0.0104$  нм). Значения эквивалентных ширин этой линии для HD 221170 и Арктур

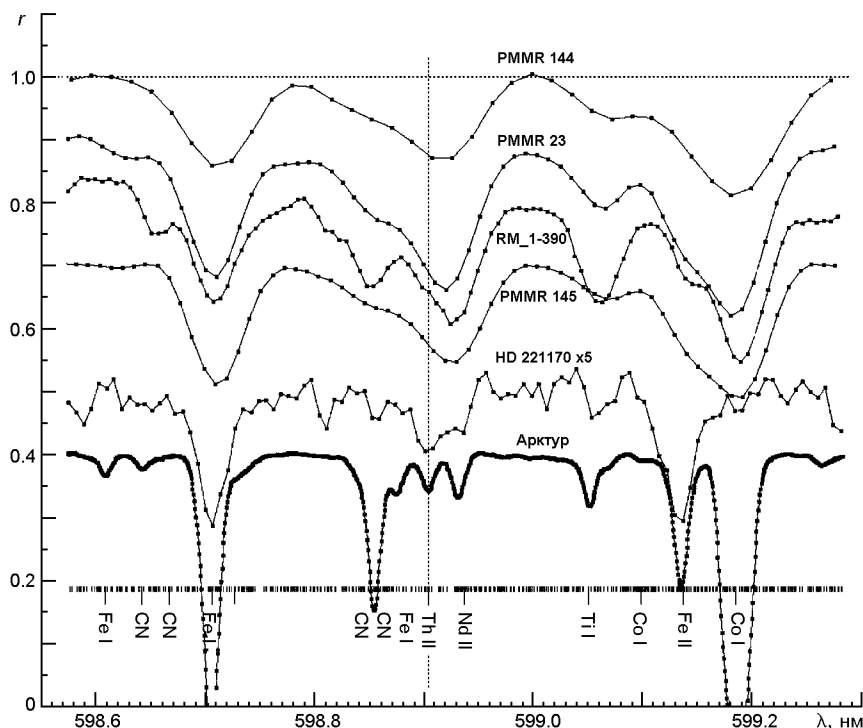
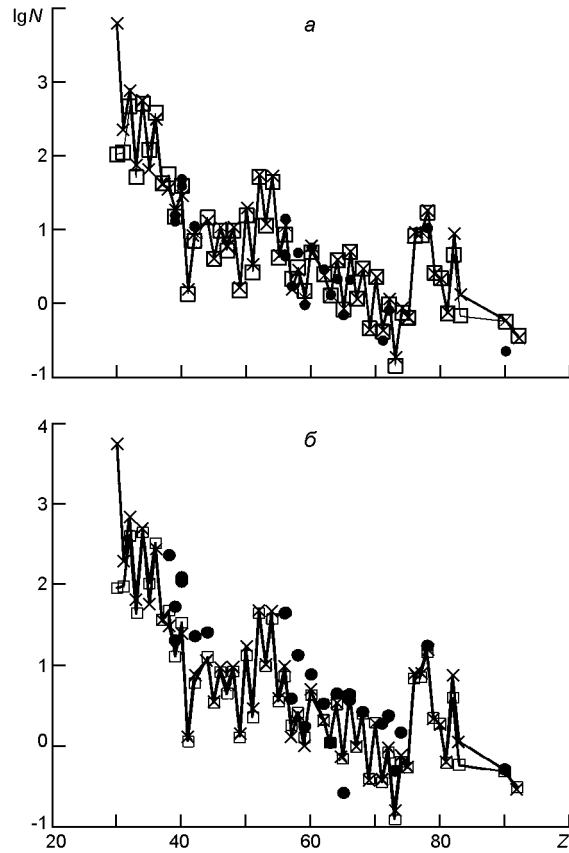


Рис. 1. Спектры  $r = III_0$  звезд-гигантов нашей Галактики (Арктур [12], звезды гало HD 221170 [6]), сверхгигантов ММО (PMMR144, PMMR23, PMMR145) и сверхгиганта БМО (RM\_1-390) в области линии тория  $\lambda = 598.5485$  нм. Максимальная интенсивность линии, наблюдаемая для PMMR144, соответствует эквивалентной ширине 0.0104 нм. Каждый спектр смещен вдоль вертикальной оси на 0.1-0.2 относительно предыдущего спектра

равны 0.0003 нм и 0.0008 нм. Вклад элементов г-процесса различен для разных сверхгигантов (рис. 2) [8]. Особенно ярко выражен факт более эффективного производства элементов г-процесса в ММО на примере сверхгиганта PMMR144 (рис. 2a). В то же время вклад изотопов s-процесса не превосходит 0.4 dex, если рассматривать его как разницу содержания элементов нейтронного захвата и значений выхода изотопов г-процесса.

В отличие от маломассивных звезд гало нашей Галактики с избыточным содержанием элементов г-процесса, которые образовались вскоре после формирования Галактики и сохранились до нашего времени благодаря малым массам ( $< 1.3 M_{\odot}$ ), у массивных и быстро эволюционирующих сверхгигантов Малого и Большого Магеллановых Облаков избыточное содержание таких элементов может быть объяснено тем, что в настоящее время есть дополнительный механизм нуклеосинтеза сверхтяжелых элементов в их окрестности, или тем, что эти звезды образовались из вещества межзвездной среды, уже обогащенного продуктами нейтронного захвата. В пользу первого предположения могло бы свидетельствовать наличие в их спектрах линий радиоактивных элементов с малым периодом полураспада, например актиния.

Рис. 2. Наблюдаемое содержание элементов нейтронного захвата: *a* — для сверхгиганта ММО PMMR144 (точки) и теоретические оценки выхода изотопов  $r$ -процесса по данным [2] (квадратики) и [3] (косые крестики); *б* — для сверхгиганта БМО RM\_1-667



#### НАБЛЮДАТЕЛЬНЫЙ МАТЕРИАЛ, ПАРАМЕТРЫ МОДЕЛЕЙ АТМОСФЕР И ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОДЕРЖАНИЯ АКТИНИЯ В СВЕРХГИГАНТАХ

Мы использовали спектры красных сверхгигантов в Магеллановых облаках, полученные на 3.6-м телескопе Европейской Южной обсерватории [11]. Спектральное разрешение составляло  $R = \lambda / \Delta\lambda = 30000$ , отношение сигнала к шуму  $S/N > 100$ , диапазон длин волн  $\lambda = 500 \dots 720$ ,  $580 \dots 670$  и  $581 \dots 709$  нм для сверхгигантов PMMR23, PMMR144 и RM\_1-667 соответственно. Параметры моделей атмосфер ( $T_{\text{эф}}/1g$ ) сверхгигантов Магеллановых Облаков PMMR23 (4240/0.12) и PMMR144 (4100/-0.7) были взяты из работ [7, 8, 11]. Мы использовали индивидуальные модели атмосфер с указанными параметрами, рассчитанные по программе SAM12.7 [17]. Для сверхгиганта RM\_1-667 параметры модели были переопределены методом синтетического спектра по неблендированным линиям Fe I, Fe II, которые располагаются близко одна к другой и к исследуемым линиям актиния.

Подобранная таким образом модель заметно улучшила приближение синтетического спектра к наблюдаемому (рис. 3). Видно, что модель с параметрами 4000/0.5 и  $[\text{Fe}/\text{H}] = -0.5$ , взятая из сетки моделей Куруца [14], хорошо описывает линии Fe I и Fe II. Значение эффектив-

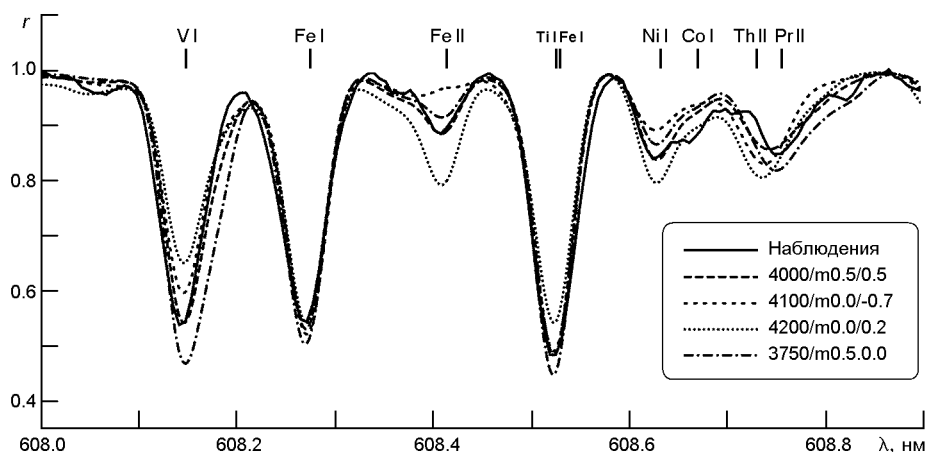


Рис. 3. Подбор модели атмосферы для сверхгиганта RM\_1-667

ной температуры сверхгигантов в БМО и ММО зависит от металличности [15]. Она учитывается, если определены параметры методом синтетического спектра, в рамках моделей с дефицитом металлов.

Силы осцилляторов для некоторых сильных линий ионизованного актиния появились в литературе сравнительно недавно, в полуэмпирическом приближении Хартри — Фока в 2007 г. [18] и в приближении Фока — Дирака [24] в 2012 г. В область длин волн спектров, имеющих в нашем распоряжении, попадают четыре линии ионизованного актиния, силы осцилляторов для которых приведены в упомянутых работах:  $= 591.085, 616.475, 616.783$  и  $624.283$  нм с соотношением лабораторных интенсивностей  $300 : 200 : 30 : 100$ . Близкие соотношения были также получены в наших вычислениях для звезд PPMR144 и PPMR23.

В дальнейшем мы исключили из рассмотрения линию  $616.783$  нм ввиду ее малой интенсивности и относительно малой чувствительности к изменению содержания актиния. Линия  $624.283$  нм составляет бленду с сильной линией нейтрального ванадия и также не рассматривалась. Пригодными для определения содержания актиния оказались первые две линии ионизованного актиния из четырех, указанных выше:  $591.085$  нм и  $616.475$  нм.

#### АНАЛИЗ СПЕКТРОВ СВЕРХГИГАНТОВ PPMR23, PPMR144 И RM\_1-667

Для исследуемых звезд был проведен анализ всех молекулярных и атомных линий вблизи деталей спектра, идентифицированных как линии ионизованного актиния. Синтетические спектры в области линий актиния были рассчитаны по программе В. Цымбала SYNTHV [23] (версия 2012 г.), которая использует атомные данные из базы VALD-2

и массив молекулярных линий, составленный автором в работах [21, 23] и версия 2016 г., использующая список VALD-3. Кроме того, для расчетов использовались программы С. Хана SYNTHM [13] и Я. Павленко WITA [16] со списком атомных линий из VALD-3 [21], программы SYNTHЕ [14] и URAN[25] также со списком VALD-3 [21]. При определении содержания актиния в атмосферах исследуемых звезд использовались все перечисленные программы, используя преимущества той или иной для конкретных задач и для проверки результатов расчета. Так, при исследовании молекулярного спектра использовалась программа В. Цымбала SYNTHV [23] (версия 2012 г.).

При исследовании линии ионизованного актиния  $\lambda = 616.475$  нм области  $\lambda = 610...640$  нм отождествляются линии молекулярных полос CN и C<sub>2</sub>, их интенсивность зависит от соотношений содержаний C, N и O, которые определялись в атмосферах звезд PMMR23, PMMR144 и RM\_1-667 по запрещенной линии [O I]  $\lambda = 630.0304$  нм и по участкам наиболее интенсивного молекулярного спектра C<sub>2</sub> ( $\lambda = 615.2...615.7$  и  $618.2...619.0$  нм), а также CN ( $\lambda = 619.4...619.8$ ,  $620.7...621.2$  и  $622.0...622.8$  нм) путем трех-четырёх итераций в последовательности O I C<sub>2</sub> CN. Чувствительность молекулярного спектра C<sub>2</sub> к содержанию углерода и спектра CN к содержанию азота для PMMR144 показана на рис. 4.

Первым шагом данной работы при наличии атомных данных для актиния из работ [18, 24] были получены оценки содержания этого элемента из сравнения наблюдаемых и теоретических спектров PMMR23, PMMR144 и RM\_1-667 по линии ионизованного актиния  $\lambda = 616.475$  нм, которая не попадает на участки интенсивного молекулярного спектра. Мы оценили вклад двух соседних линий, Ti I  $\lambda = 616.4660$  нм и CN  $\lambda = 616.4666$  нм в общую с линией актиния бленду — он оказался незначительным. Для PMMR23 и PMMR144 мы определили фактически только верхние пределы величин  $\lg N(\text{Ac}/\text{H}) = -15.1$  и  $-15.0$ , соответственно (рис. 5). На рис. 5а наблюдаемые спектры PMMR23 сравниваются с синтетическими спектрами, рассчитанными при  $\lg N(\text{Ac}/\text{H}) = -14.6$ ,  $-15.1$ ,  $-15.6$ . Спектры, рассчитанные при  $\lg N(\text{Ac}/\text{H}) = -15.1$  и  $-15.6$ , на рисунке совпадают. Аналогично для PMMR144 (рис. 5б) показаны результаты расчетов для  $\lg N(\text{Ac}/\text{H}) = -14.5$ ,  $-15.0$ ,  $-15.5$ , когда синтетические спектры при значениях  $\lg N(\text{Ac}/\text{H}) = -15.0$  и  $-15.5$  совпадают. Расчеты, выполненные с использованием программы URAN [25], позволяют в полуавтоматическом режиме выполнять подгонку к наблюдаемому спектру синтетического, рассчитанного программой SYNTHЕ [14].

Несколько большее содержание актиния получено для сверхгиганта RM\_1-667  $\lg N(\text{Ac}/\text{H}) = -14.1$  с используемой нами ранее [8] моделью 3750/-1.5, (рис. 5в). Необходимо отметить чувствительность этой линии к изменению содержания актиния.

С уточненной нами моделью (4000/0.5) (рис. 3) линии ионизованного актиния на длинах волн  $\lambda = 591.085$  и  $616.475$  нм исследовались с

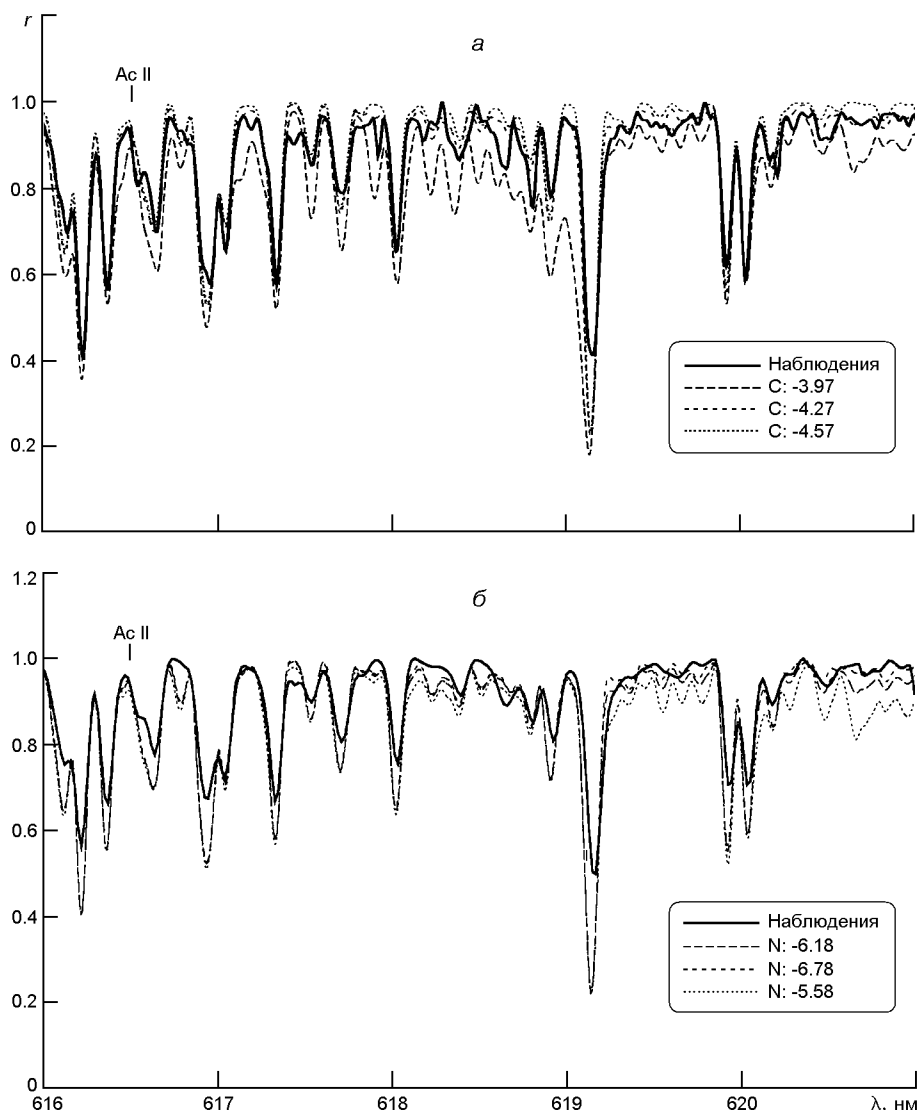


Рис. 4. Синтетические молекулярные спектры для PPMR144: *a* — спектры  $C_2$  при разных значениях содержания углерода (наиболее интенсивный спектр  $C_2$  в участках  $\lambda = 615.2...615.7$  и  $618.2...619.0$  нм); *б* — спектры CN при разных значениях содержания азота (наиболее интенсивный спектр CN в участках  $\lambda = 619.4...619.8$ ,  $620.7...621.2$  и  $622.0...622.8$  нм)

точки зрения вклада как молекулярных, так и атомных линий. Чтобы описать спектр в районе линии  $\lambda = 616.475$  нм (см. рис. 6а), были рассчитаны длины волн линий редкоземельных элементов с использованием уровней энергии, приведенных на сайте [www.nist.gov](http://www.nist.gov), в области, непосредственно примыкающей к линии ионизованного актиния. Это линии Nd II  $\lambda = 616.397$  нм,  $E = 1.795$  эВ; Sm II  $\lambda = 616.4024$  нм,  $E = 1.070$  эВ; Nd II  $\lambda = 616.426$  нм,  $E = 3.250$  эВ; Nd II  $\lambda = 616.428$  нм,  $E = 2.670$  эВ. При учете рассчитанных нами дополнительных атомных линий с минимальным вкладом наблюдаемая линия  $\lambda = 616.475$  нм хорошо описывается при содержании актиния  $\lg N(\text{Ac}/\text{H}) = -13.2$  (рис. 6а).



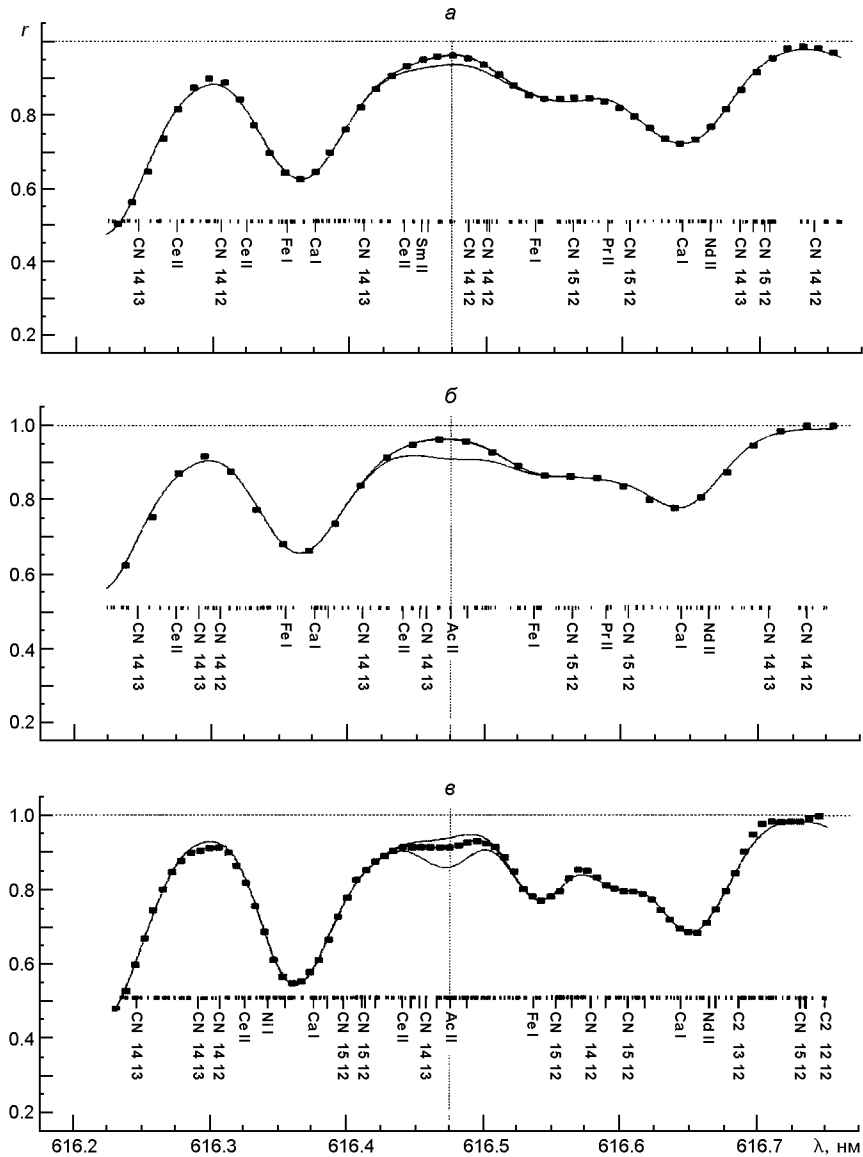


Рис. 5. Сравнение наблюдаемых спектров сверхгигантов PMMR23, PMMR144, RM\_1-667 (квадратики) с синтетическими спектрами (сплошные линии) соответственно для трех содержаний актиния  $\lg N(\text{Ac}/\text{H}) = -15.1 \pm 0.5$ ,  $-15.0 \pm 0.5$ ,  $-14.1 \pm 0.5$  в области линии ионизованного актиния 616.475 нм. Для сверхгиганта RM\_1-667 использовалась модель  $T_{\text{эф}} = 3750$ ,  $\lg g = -1.5$  [8]. В нижней части рисунков отмечены положения линий, их идентификация и атомные веса изотопов азота и углерода

С использованием второй линии актиния на длине волны 591.085 нм получаем содержание актиния  $\lg N(\text{Ac}/\text{H}) = -13.4$  (рис. 6б). Вторая линия поглощения актиния в спектре RM\_1-667, линия на длине волны 591.085 нм, имеет практически одинаковые силы осцилляторов, опубликованные в работах [18, 24]:  $\lg gf = -0.58$  и  $-0.60$ . Средняя величина содержания актиния по двум линиям  $\lg N(\text{Ac}/\text{H}) = -13.3 \pm 0.1$ .

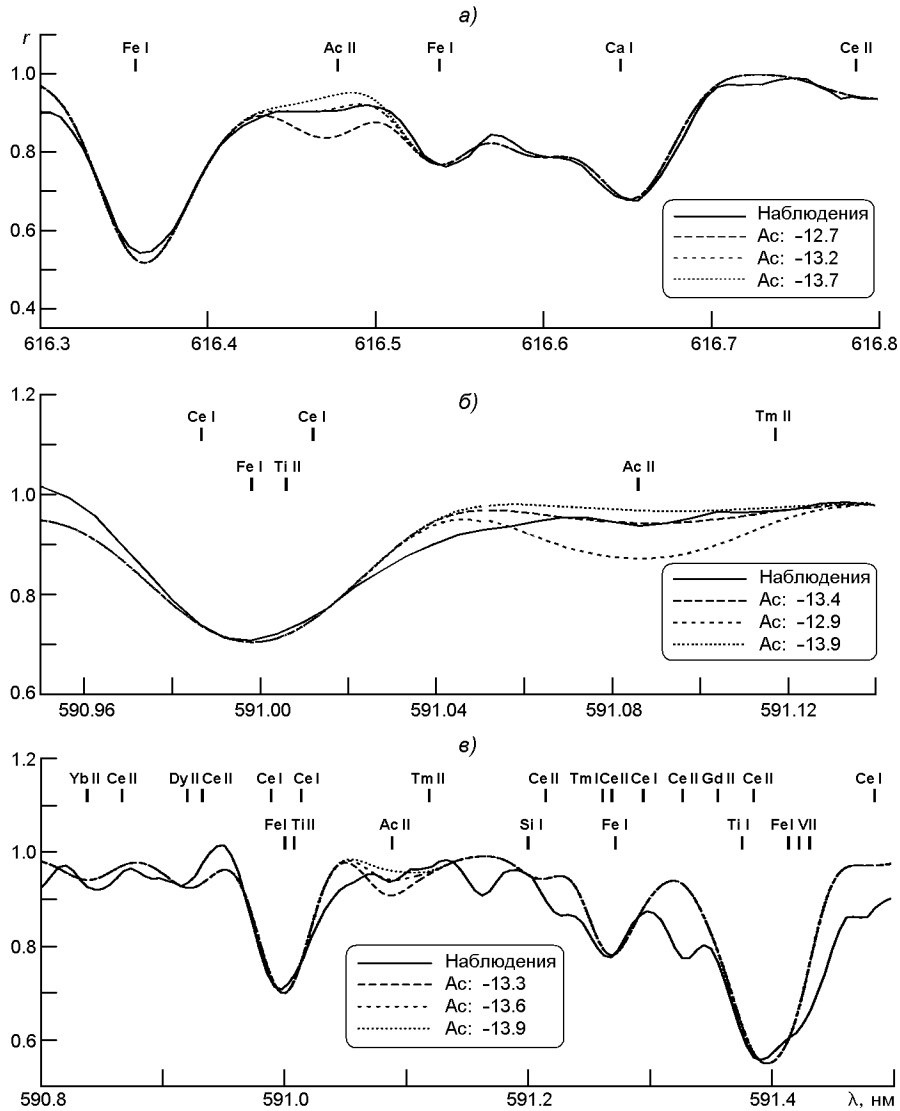


Рис. 6. Спектры актиния для сверхгиганта БМО RM\_1-667, полученные с использованием модели  $T_{\text{эф}} = 4000 \text{ K}$ ,  $[\text{Fe}/\text{H}] = -0.5$  и  $\lg g = 0.0$ ,  $IP = 5.38 \text{ эВ}$ : *a* — в окрестности линии 616.475 нм, *б* — 591.085 нм; *в* — спектры, полученные при уменьшении  $\lg g$  на 0.5 (содержание актиния при этом изменяется на 0.2 dex)

Оценена чувствительность линий при изменении параметров атмосферы. При уменьшении ускорения свободного падения на 0.5 при параметрах модели 4000/0.0 содержание актиния равно  $\lg N(\text{Ac}/\text{H}) = -13.6$  (рис. 6*в*), а при увеличении эффективной температуры на 250 К по обеим линиям получаем  $\lg N(\text{Ac}/\text{H}) = -13.35$ . При этом содержание актиния, определенное по линиям 616.475 нм и 591.085 нм, равно  $\lg N(\text{Ac}/\text{H}) = -13.2$ , и  $\lg N(\text{Ac}/\text{H}) = -13.5$  соответственно. При уменьшении температуры на 250 К получаем  $\lg N(\text{Ac}/\text{H}) = -13.6$  как среднее по обеим линиям.

Можно утверждать, что идентифицированные слабые линии актиния As II в спектре сверхгиганта RM\_1-667, дающие практически одинаковые содержания по обеим линиям, мало чувствительны к изменениям параметров атмосферы и более чувствительны к изменению химического содержания. Примером линии, чувствительной к содержанию исследуемого элемента, может быть слабая линия поглощения тория на длине волны Th II 598.9045 нм [6].

Наличие атомных данных очень важно при исследовании радиоактивных элементов с коротким периодом полураспада в атмосферах звезд. Так, расчеты синтетического спектра для линии 616.783 нм не подтвердили заметного вклада актиния. И наоборот, было обнаружено, что линии ионизованного актиния на длинах волн 616.475, 591.085 нм достаточно чувствительны к изменению содержания этого элемента и могут использоваться для анализа содержания актиния. В итоге содержание актиния в атмосфере сверхгиганта RM\_1-667 равно  $\lg N(\text{As}/\text{H}) = -13.3 \pm 0.1$  при потенциале ионизации нейтрального актиния 5.38 эВ [19].

**Содержания актиния и тория в атмосферах PMMR23, PMMR144, RM\_1-667, рассчитанные с использованием разных значений потенциала ионизации  $IP$  и сумм по состояниям  $PF$  для актиния**

Звезда, модель ( $T_{\text{эф}} / \lg g / V_t$ )	Содержание актиния			Содержание тория
	$IP = 6.90$ эВ [14], $PF$ [14]	$IP = 5.38$ эВ [19], $PF$ [14]	$IP = 5.38$ эВ [19], $PF$ [18]	
PMMR23 (4240/0.12/4.0)	< -13.5	< -14.0	< -15.1	-11.8 [6, 20]
PMMR144 (4100/-0.7/4.0)	< -14.0	< -14.5	< -15.0	-12.65 [6]
RM_1-667 (4000/0.5/3.0)			-13.3 $\pm$ 0.1	-11.30

Для PMMR23 и PMMR144 мы получили верхний предел содержания актиния  $\lg N(\text{As}/\text{H}) = -13.5$  и  $-14.0$  соответственно при потенциале ионизации нейтрального актиния 6.9 эВ. Новые значения потенциала ионизации и сумм по состояниям снижают верхний предел содержания актиния до  $\lg N(\text{As}/\text{H}) = -15.1$  и  $\lg N(\text{As}/\text{H}) = -15.0$ . Также очевидно, что есть необходимость анализа спектров с большим спектральным разрешением и отношением сигнала к шуму. Напомним, что исследуемые звезды находятся в южном полушарии (склонение  $-70...-80^\circ$ ) и имеют  $V$ -блеск слабее  $12^m$ . Результаты работы даны в таблице.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В таблице приводятся результаты исследования содержания актиния в атмосферах PMMR23, PMMR144, RM\_1-667. Там же даны оценки содержания тория по данным наших предыдущих исследований (последняя строка). Содержание актиния в урановых и ториевых рудах на Земле на 7...10 порядков меньше содержания тория. Высокое содержание актиния в атмосфере RM\_1-667, полученное в настоящей работе, предполагает наличие неизвестного пока механизма постоянного синтеза этого быстро распадающегося элемента. Возможное объяснение может быть связано с пока неизученными высокоэнергетическими процессами, происходящими в верхних слоях атмосфер сверхгигантов. На подобные процессы указывают искаженные профили сильных линий.

В спектре сверхгиганта RM\_1-667 профиль линии H  $\gamma$  скорее всего отображает движение потока от наблюдателя (компонент с большей длиной волны) и более сильным истечением вещества к наблюдателю (компонент с меньшей длиной волны). В спектре этой звезды сильные линии дублета натрия на длинах волн  $\lambda = 589.0$  и  $589.6$  нм показывают смещение в коротковолновую сторону на  $0.032$  нм, что соответствует истечению вещества со скоростью  $16$  км/с.

Профиль линии водорода H  $\gamma$  в спектре сверхгиганта RM\_1-667 напоминает профили сильных линий, характерные для высокоскоростных звезд ("run-away stars"), зачастую имеющих в паре релятивистский объект, например нейтронную звезду. В частности, для звезды HIP13962, сверхгиганта спектрального класса G0, являющейся "run-away star", на некоторых временных интервалах профили линий водорода H  $\gamma$  имеют аналогичную структуру [27]. На длине волны  $616.475$  нм, одновременно с эмиссией в водородной линии H  $\gamma$ , регистрируется слабая линия ионизованного актиния с эквивалентной шириной  $0.00035$  нм.

Замечена интересная особенность при исследовании линий актиния в спектрах звезд, требующая более тщательного изучения. В тех спектрах, в которых можно идентифицировать линии актиния, профиль линии H  $\gamma$ , как правило, претерпевает искажения и содержит эмиссионный компонент. Из шести имеющихся у нас спектров сверхгиганта HIP13962 спектрального класса G0 I только один спектр, полученный в 1995 г., имеет эмиссионный компонент и предельно слабую линию ионизованного актиния в спектре (рис. 7). Возможно, более сильные линии ионизованного актиния могут быть обнаружены в коротковолновой части спектра, где линии тяжелых элементов сильно блендированы.

Линия ионизованного актиния  $616.475$  нм с эквивалентной шириной  $0.00145$  нм наблюдается в спектре звезды VL 138, являющейся членом карликовой галактики в созвездии Печи [1]. На рис. 8 показан профиль линии водорода H  $\gamma$  в спектре этой звезды. Помимо эмисси-

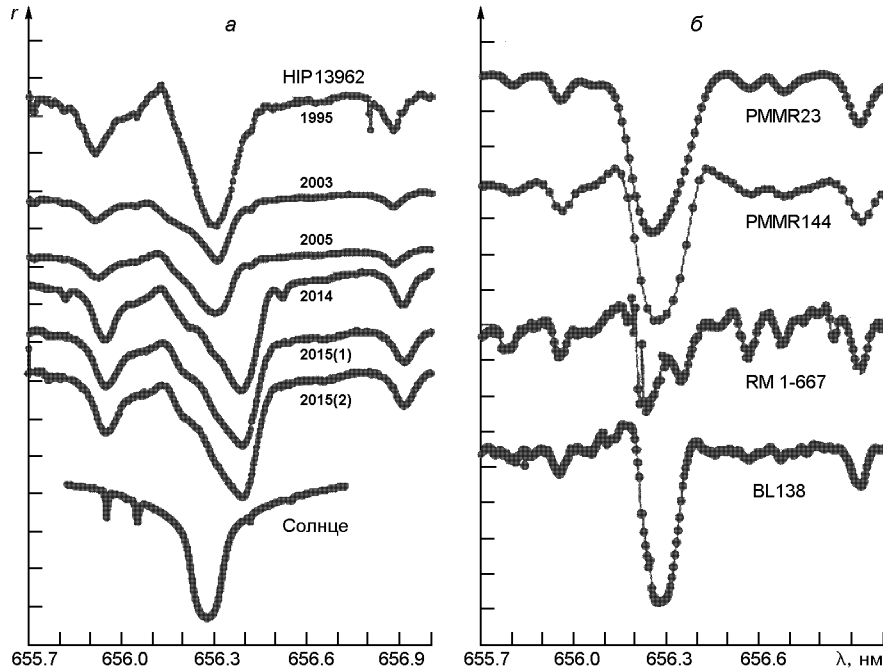


Рис. 7. Профили линии водорода H : *a* — в спектрах сверхгиганта HIP 13962 по наблюдениям обсерваторий От-Прованс, Франция (1995, 2003, 2005 гг.) и Бохунсан, Корея (2014 и 2015 гг.); *б* — в спектрах сверхгигантов PMMR23, PMMR144 и RM\_1-667

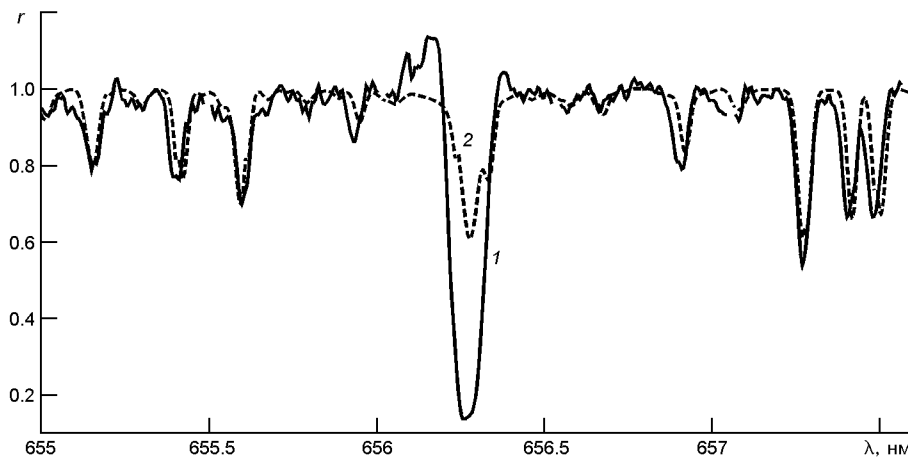


Рис. 8. Профиль линии водорода H в спектре гиганта BL 138 в карликовой галактике в созвездии Печи (сплошная линия 1) и синтетический спектр (штриховая линия 2), рассчитанный с параметрами, которые использовались в работе ( $T_{\text{эф}} = 3939$ ,  $\lg g = 0.71$ ,  $V_r = 2.3$  км/с) [1]

онных компонентов, линия значительно сильнее в наблюдаемом спектре, что свидетельствует о неравновесном состоянии атмосферы гиганта BL 138 и более высокой температуре в слоях образования линии H .

## ВЫВОДЫ

Наблюдаемые в звездных атмосферах линии ионизованного актиния Ac II, радиоактивного элемента с периодом полураспада 21.772 года, являются индикатором мощных аккреционных процессов, в результате которых может происходить синтез атомов актиния. Об этом свидетельствуют искаженные профили и эмиссии в линиях водорода. Верхний предел содержания актиния в атмосферах сверхгигантов ММО PMMR23 и PMMR144 на 15 порядков меньше содержания водорода. Содержание актиния в атмосфере сверхгиганта БМО RM\_1-667 равно  $\lg N(\text{Ac}/\text{H}) = -13.3$  в шкале  $\lg N(\text{H}) = 0$  при выборе модели 4000/0.5 и  $[\text{Fe}/\text{H}] = -0.5$ .

Авторы благодарят В. Цымбала и С. Хана за предоставление их программ расчета синтетического спектра (SYNTHV и SYNTHM) [14, 23] и авторов базы данных VALD-3 [21] за возможность ее использовать. С. М. Андриевский и В. А. Ющенко были поддержаны грантом SCOPES (проект No. IZ73Z0-128180/1.)

1. Andrievsky S. M., Korotin S. A., Hill V., Zhukova A. V. Barium abundance in the central part of the dSph Fornax galaxy. *Astron. Astrophys.* 2017, ArXiv 171004930.
2. Arnould M., Goriely S., Takahashi K. The r-process of stellar nucleosynthesis: Astrophysics and nuclear physics achievements and mysteries. *Phys. Rep.* 2007. 450. P. 97—213.
3. Burris D. L., Pilachowski C., Armandroff T. E., Sneden C., Cowan J. J., Roe H., Neutron-capture elements in the early galaxy: insights from a large sample of metal-poor giants. *Astrophys. J.* 2000. 544. P. 302—319.
4. Debierne A.-L. Sur un nouvelle matière radio active. *C. R. Acad. Sci.* 1899. 129. P. 593—595.
5. Fry C., Thoennessen M. Discovery of actinium, thorium, protactinium, and uranium isotopes. *Atomic data and nuclear data tables.* 2013. 99, N 3. P. 345—364.
6. Gopka V. F., Shavrina A. V., Yushchenko V. A., Vasil'eva S. V., Yushchenko A. V., Andrievsky S. M. On the thorium absorption lines in the visible spectra of supergiant stars in the Magellanic Clouds. *Bull. Crimean Astrophys. Observ.* 2013. 109, N 1. P. 41—47.
7. Gopka V. F., Yushchenko A. V., Andrievsky S. M., Goriely S., Vasileva S., Kang Y. W. The abundances of chemical elements in the atmospheres of K-supergiants in the Small Magellanic Cloud and Arcturus. *IAU Symposium Proceedings of the international Astronomical Union 228, From Lithium to Uranium: Elemental Tracers of Early Cosmic Evolution*, Held in Paris, France, May 23—27, 2005. Eds Hill V., François P., Primas F., Cambridge: Cambridge University Press. P. 535—536.
8. Gopka V., Yushchenko V., Kovtyukh V., Shavrina A., Yushchenko A., Vasilyeva S., Pavlenko Ya., Andrievsky S., The abundances of heavy elements in red supergiants of Magellanic Clouds. *Odessa Astron. Publs.* 2013. 26, N 1. P. 54—59.
9. Gopka V. F., Yushchenko A. V., Shavrina A. V., Mkrtychian D. E., Hatzes A. P., Andrievsky S. M., Chernysheva L. V. On the radioactive shells in peculiar main sequence stars: the phenomenon of Przybylski's star. *IAU Symp. 224, The A-Star Puzzle*, Held in Poprad, Slovakia, July 8—13, 2004. Eds J. Zverko et al. 2004, Cambridge, UK: Cambridge University Press. P. 734—742.

10. Gopka V. F., Yushchenko A. V., Yushchenko V. A., Panov I. V., Kim Ch. Identification of absorption lines of short half-life actinides in the spectrum of Przybylski's star (HD 101065). *Kinematics and Physics of Celestial Bodies*. 2008. 24, N 2. P. 89—98.
11. Hill V. Chemical composition of six K supergiants in the Small Magellanic Cloud. *Astron. and Astrophys.* 1997. 324. P. 435—2448.
12. Hinkle K., Wallace L., Valenti J., Harmer D. Visible and near infrared atlas of the Arcturus spectrum 3727-9300 Å. Eds K. Hinkle et al. (San Francisco: ASP) ISBN: 1-58381-037-4. 2000. (magnetic tape copy).
13. Khan S. A., The code of spectrum synthesis in atmospheres of Ap stars. *J. Quant. Spectrosc. and & Radiat. Transfer*. 2004. 88, N. 1-3. P. 71—81.
14. Kurucz R. L. Atomic data for opacity calculations. Kurucz CD-ROM No. 1-23. 1993, Cambridge, Mass., Smithsonian Astrophys. Observ. URI: <http://www.stsci.edu/hst/observatory/crds/k93models.html>
15. Levesque E. M. The physical properties of red supergiants hot and cool: Bridging gaps in massive star evolution / ASP Conference Series, *Proceedings of a Workshop held at the California Institute of Technology*, Pasadena, California, 10-12 November 2008. Eds by C. Lietherer et al. San Francisco: Astronomical Society of the Pacific. 2010. 425. P. 103—123.
16. Pavlenko Ya. V. Analysis of the spectra of two Pleiades brown dwarfs: Teide 1 and Calar 3. *Astron. Astrophys. Sci.* 1997. 253. P. 43—53.
17. Pavlenko Ya. V. Model atmospheres of red giants. *Astron. Reports*. 2003. 47. P. 59—67.
18. Quinet P., Argante C., Fivet V., Terranova C., Yushchenko A. V., Biémont É. 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.* 2007. 474, N 1. P. 307—314.
19. Roßnagel J., Raeder S., Hakimi A., Ferrer R., Trautmann N., Wendt K. Determination of the first ionization potential of actinium. *Phys. Rev.— A Gen. Phys.* 2012. 85. 012525 (6 pages).
20. Russell S. C., Bessell M. S. Abundances of the heavy elements in the Magellanic Clouds. I – Metal abundances of F-type supergiants. *Astrophys. J. Suppl. Ser.* 1989. 70. P. 865—898.
21. Ryabchikova T. A., Pakhomov Yu. V., Piskunov N. E. New release of Vienna atomic line database (VALD-3) and its integration in virtual atomic and molecular data centre (VAMDC). *Уч. зап. Казан. ун-та, Сер. физ.-мат. н.* 2011. 153, 2. С. 61—66.
22. Spite M., Hill S., Spite F., Francois P. Chemical evolution of Magellanic Clouds. II. Equivalent widths and abundances for three young supergiants of the SMC. *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.* 1988. 76, N 3. P. 405—409.
23. Tsymbal V. STARSP: A software system for the spectra of normal stars. Model atmospheres and spectrum synthesis. Eds S. J. Adelman, F. Kupka, W. W. Weiss. *ASP Conf. Ser.* 1996. 108. P. 198.
24. Urer G., Ozdemir L. The level structure of singly-ionized Actinium. *J. Korean Phys. Soc.* 2012. 61, N 3. P. 353—358.
25. Yushchenko A. V. URAN: a software system for the analysis of stellar spectra. *Proceedings of the 20th Stellar Conference of the Czech and Slovak Astronomical Institutes*, Brno, Czech Republic. Ed. by J. Dusek. ISBN 80-85882-08-6. Brno. 1998. P. 201—204.
26. Yushchenko A. V., Gopka V. F., Shavrina A. V., Yushchenko V. O., Vasileva S. V., Andrievsky S. M., Raikov A. A., Kim S., Rittipruk P., Yeuncheol J., Kang Y.-W. The abundances of chemical elements and the signs of accretion from interstellar environment in the atmosphere of PMMR23 — red supergiant of Small Magellanic Cloud.

*Kinematics and Physics of Celestial Bodies*. 2017. 33, N 5. P. 199—216.

27. Yushchenko V., Yushchenko A., Gopka V., Shavrina A., Kovtyukh V., Hong K. S., Mkrtychian D., Thanu N. HIP 13962 — the possible former member of binary system with Supernova. *Odessa Astron. Publ.* 2016. 29. P. 230—232.

Статья поступила в редакцию 28.12.2017

В. Ф. Гопка<sup>1</sup>, А. В. Шаврина<sup>2</sup>, В. О. Ющенко<sup>1</sup>,  
О. В. Ющенко<sup>3</sup>, Я. В. Павленко<sup>2</sup>, С. М. Андриєвський<sup>1</sup>,  
С. В. Васильєва<sup>1</sup>, Ч. Кім<sup>4</sup>, Й. Джеонг<sup>5</sup>, Ю. П. Любчик<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Науково-дослідний інститут «Астрономічна обсерваторія»

Одеського національного університету імені І. І. Мечникова

<sup>2</sup>Головна астрономічна обсерваторія Національної академії наук України

<sup>3</sup>Дослідний інститут Астрокамп Контенгс, Гойанг, 10-329, Республіка Корея

<sup>4</sup>Чонгбуцький національний університет, Чунджу, 561-756, Республіка Корея

<sup>5</sup>Університет Сейджон, Сеул, 05-006, Республіка Корея

#### ВМІСТ АКТИНІУ В АТМОСФЕРАХ ТРЬОХ ЧЕРВОНИХ НАДГІГАНТІВ МАГЕЛЛАНОВИХ ХМАР

Проаналізовано вміст актинію в атмосферах двох червоних надгігантів, PMMR23 і PMMR144, у Малій Магеллановій Хмарі і в атмосфері надгіганта RM\_1-667, що належить Великій Магеллановій Хмарі. Використовувались спектральні спостереження, отримані на 3.6-м телескопі Європейської Південної обсерваторії з роздільною здатністю  $R = 30000$ . В атмосферах PMMR23 та PMMR144 актиній не знайдено. Оцінено лише верхню межу його вмісту:  $\lg N(\text{Ac}/\text{H}) = -15.1$  і  $-15.0$  відповідно. Для RM\_1-667 вміст актинію становить  $\lg N(\text{Ac}/\text{H}) = -14.1 \dots -13.3$ , в залежності від прийнятих параметрів моделі атмосфери. Для аналізу використовувались лінії іонізованого актинію 616.475 нм і 581.085 нм.

**Ключові слова:** галактики MMX, BMX, зорі пізніх класів, PMMR23, PMMR144, RM\_1-667, ядерні реакції, нуклеосинтез, вміст хімічних елементів, актиній.

V. F. Gopka<sup>1</sup>, A. V. Shavrina<sup>2</sup>, V. A. Yushchenko<sup>1</sup>,  
A. V. Yushchenko<sup>3</sup>, Ya. V. Pavlenko<sup>2</sup>, S. M. Andrievsky<sup>1</sup>,  
S. V. Vasileva<sup>1</sup>, Ch. Kim<sup>4</sup>, Y. Jeong<sup>5</sup>, Yu. P. Lyubchik<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Scientific Research Institute “Astronomical Observatory”  
of I. I. Mechnikov Odessa National University

<sup>2</sup>Main Astronomical Observatory of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv

<sup>3</sup>Astrocamp Contents Research Institute, Goyang, 10-329, Republic of Korea

<sup>4</sup>Chungbuk National University, Cheongju, 561-756, Republic of Korea

<sup>5</sup>Sejong University, Seoul, 05-006, Republic of Korea

#### THE ANALYSIS OF ACTINIUM ABUNDANCE IN THE ATMOSPHERES OF THREE MAGELLANIC CLOUDS RED SUPERGIANTS STARS

The analysis of actinium abundance in the atmosphere of three red supergiants in Magellanic Clouds was performed. These are PMMR23 and PMMR144 in SMC and RM\_1-667 in LMC. Spectral observations obtained at ESO 3.6 meter telescope with resolving power  $R = 30,000$  were used. Only upper limits of actinium abundance were



found for SMC stars PMMR23 and PMMR144:  $\lg N(\text{Ac}/\text{H}) < -15.1$  and  $-15.0$ . The abundance of actinium in the atmosphere of LMC red supergiant RM\_1-667 was estimated to be in the range from  $\lg N(\text{Ac}/\text{H}) = -14.1$  to  $-13.3$  if we accept different values for atmospheric parameters of this star. The lines of ionized actinium 616.475 nm and 591.085 nm was used for analysis.

**Key words:** galaxies SMC, LMC, late-type stars, PMMR23, PMMR144, RM\_1-667, nuclear reactions, nucleosynthesis, abundances, actinium.