

УДК 524.314-355

**О. В. Ющенко¹, В. Ф. Гопка², А. В. Шаврина³, В. О. Ющенко²,
С. В. Васильева², С. М. Андрієвський², А. А. Райков⁴, С. Ким¹,
П. Ріттіпрак¹, Дж. Йончеол¹, Я.-В. Канг¹**

¹Університет Сейджон, Сеул, 05-006, (Південна) Корея
avyushchenko@gmail.com, sek@sejong.edu,
nice_dongdang@hotmail.com, yeuncheoljeong@sejong.ac.kr, kangyw@sejong.ac.kr

²Науково-дослідний інститут «Астрономічна обсерваторія»
Одеського національного університету імені І. І. Мечникова
вул. Маразліївська, 1 в, Одеса, Україна, 65014
vfgopka@ukr.net, vladimiryushchenko@gmail.com
cerera.sveta@rambler.ru, andrievskii@ukr.net

³Головна астрономічна обсерваторія Національної академії наук України
вул. Академіка Заболотного 27, Київ, Україна, 03143
shavrina@mao.kiev.ua

⁴Головна (Пулковська) астрономічна обсерваторія Російської академії наук
Пулківське шосе, 65 кор. 1, Санкт-Петербург, Росія, 196140
raikov@mail.ru

Особенности вмісту хімічних елементів в атмосфері червоного надгіганта RMMR23 у Малій Магеллановій Хмарі як результат процесу акреції міжзоряного газу

Проведено аналіз хімічного складу червоного надгіганта RMMR23 у Малій Магеллановій Хмарі. Знайдено вміст 35 хімічних елементів, а для двох елементів (Ti та U) вказано верхню межу вмісту. Дефіцит відносного вмісту важких елементів в атмосфері RMMR23 на 0.6—1.0 dex менший за дефіцит елементів групи заліза. У спектрах червоних надгігантів Малої Магелланової Хмари RMMR27, RMMR48, RMMR102 та RMMR144, що належать до областей цієї галактики з відносно високими швидкостями руху зір і міжзоряного газу, знайдено емісійні компоненти в лінії водню H α і показано відсутність такої емісії у спектрі RMMR23. Швидкості руху зір і міжзоряного газу в районі розташування RMMR23 відносно малі. Обговорюється вплив можливої акреції міжзоряного газу на атмосфери RMMR23 та інших

надгігантів Магелланових Хмар. Були використані дані спектральних спостережень, отримані на 3.6-м телескопі Європейської Південної обсерваторії в Чилі з розділенням $R = 30000$.

ОСОБЕННОСТИ СОДЕРЖАНИЯ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В АТМОСФЕРЕ КРАСНОГО СВЕРХГИГАНТА PMMR23 МАЛОГО МАГЕЛЛАНОВА ОБЛАКА КАК РЕЗУЛЬТАТ ПРОЦЕССА АККРЕЦИИ МЕЖЗВЕЗДНОГО ГАЗА, Ющенко А. В., Гопка В. Ф., Шаврина А. В., Ющенко В. А., Васильева С. В., Андриевский С. М., Райков А. А., Ким С., Риттипрак П., Дж. Йончеол, Канг Я.-В. — Выполнен анализ химического состава атмосферы красного сверхгиганта PMMR23 в Малом Магеллановом Облаке. Найдено содержание 35 химических элементов, а для двух элементов (Тl и U) указаны верхние пределы содержания. Дефицит относительного содержания тяжелых элементов в атмосфере PMMR23 меньше аналогичного дефицита для элементов группы железа на 0.6—1.0 dex. В спектрах красных сверхгигантов Малого Магелланова Облака PMMR27, PMMR48, PMMR102 и PMMR144, которые расположены в областях с относительно высокими скоростями звезд и межзвездного газа, обнаружены эмиссионные компоненты в линии водорода H и показано отсутствие такой эмиссии в спектре PMMR23. Скорости движения звезд и межзвездного газа в районе расположения PMMR23 относительно малы. Обсуждается влияние возможной аккреции межзвездного газа на атмосферу PMMR23 и других сверхгигантов Магеллановых Облаков. Использовались данные спектральных наблюдений, полученные на 3.6-м телескопе Европейской Южной обсерватории в Чили со спектральным разрешением $R = 30000$.

THE PECULIARITIES OF CHEMICAL ELEMENTS ABUNDANCES IN THE ATMOSPHERE OF PMMR23 — RED SUPERGIANT OF SMALL MAGELLANIC CLOUD, AS A RESULT OF INTERSTELLAR GAS ACCRETION, by 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. — PMMR23 is a red supergiant located in the region of Small Magellanic Cloud with low velocities of stars and interstellar gas. The abundances of 35 chemical elements and the upper limits for Tl and U were found in the atmosphere of the star. The relative abundances of heavy elements are enhanced with respect to iron group elements by 0.6—1.0 dex. The spectra of several SMC red supergiants PMMR27, PMMR48, PMMR102, PMMR144, located in the region high velocities of stars and interstellar gas, show the emission components in the wings of hydrogen line H . This emission is not detected for PMMR23. We discuss the possibility of accretion of interstellar gas on the atmospheres of PMMR23 and other supergiants in Magellanic Clouds. We made the analysis of chemical composition using spectra obtained at ESO 3.6 meter telescope with spectral resolving power $R = 30000$.

ВСТУП

Відносно невелика відстань до найближчих супутників нашої Галактики — Великої і Малої Магелланових Хмар — а саме 50 кпк [3, 63] та 60.6 кпк [30] відповідно дозволяє отримати спектри найяскравіших зір цих галактик з високим розділенням. PMMR23 (зоря номер 23 з каталогу [55]) належить до класу червоних надгігантів — зір, які згідно із сучасною теорією зоряної еволюції мають масу від $8M_{\odot}$ до $25M_{\odot}$ сонячних мас, залишили головну послідовність та перебувають на стадії горіння гелію в ядрі. Після завершення цієї фази, тривалість якої не перевищує декількох мільйонів років [42, 48], та можливого зростання ефективної температури червоні надгіганти можуть перетворюватися на нейтронну зорю чи релятивістський об'єкт іншого типу [27], що може проходити як вибух наднової зорі, який збагачує міжзоряне середовище елементами r -процесу, або як гравітаційний колапс без вибуху.

Можна було очікувати [37], що результатом спостереження понад 10^6 надгігантів в найближчих галактиках протягом кількох років буде фіксація вибухів наднових та суттєве зниження яскравості деяких об'єктів. За той же час у згаданих галактиках було відкрито чотири наднові зорі [1, 14]. Беручи до уваги неминучу селекцію спостережень — спалах фіксується набагато впевненіше, ніж зникнення, можна допустити, що гравітаційний колапс без вибуху є одним із найбільш поширених сценаріїв еволюції надгігантів з масами більшими за $18M_{\odot}$ [62].

Теоретичні розрахунки передбачали можливість такого сценарію, тобто можливість принципово різного закінчення еволюції надгігантів, але для розрахунків віку зір гало Галактики методами космохронології приймалася гіпотеза про однаковість (універсальність) кривої поширеності елементів r -процесу в речовині, що була синтезована у спалахах різних наднових.

Одне з перших досліджень, в результаті якого було вказано на вірогідність неуніверсальності r -процесу в наднових, було виконано у 2005 р. [68]. Тоді це була лише вказівка на можливість різного співвідношення елементів r -процесу у речовині, що була створена в різних спалахах. Результат був наслідком порівняння хімічного вмісту радіоактивних елементів в атмосферах п'яти зір гало Галактики, зараз цей факт є загальноприйнятим [58]. Визначення віку за співвідношенням вмісту радіоактивних елементів фактично припинено або проводиться з обговоренням впливу початкового вмісту цих елементів. Наприклад, за співвідношенням вмістів торію та різних лантаноїдів в атмосфері червоного гіганта гало Галактики CS 30315-029 було показано, що можуть бути отримані значення віку в діапазоні від $+47 \cdot 10^9$ до $10 \cdot 10^9$ років [61].

Різноманітність результатів дослідження хімічного складу зір Галактики з майже однаковими значеннями ефективної температури і прискорення вільного падіння спонукала дослідників поновити обго-

ворення гіпотези Грінштейна — Хавнса [21, 24], згідно з якою особливості хімічного складу металевих зір — зір спектральних класів А — F з підвищеним вмістом елементів групи заліза або важчих елементів — можуть бути пояснені акрецією водню з міжзоряного середовища на зоряні атмосфери. В роботі [68] було знайдено можливі наслідки акреції водню та гелію в атмосферах зір спектральних класів В — F диска Галактики, тобто акреції на радіативні фотосфери. Раніше було показано [34], що при наявності потужних потоків газу у подвійних зорях наслідки акреції газу з навколорозоряного середовища можуть спостерігатися для конвективних фотосфер зір з температурами 5000...6000 К.

Нижче ми наводимо оцінки вмісту хімічних елементів в атмосфері червоного гіганта MMX PMMR23. Внаслідок більшої густини міжзоряного газу процеси зореутворення в MMX ідуть інтенсивніше, ніж у нашій Галактиці. Тому ми спробували знайти можливі наслідки взаємодії міжзоряного середовища з атмосферами надгігантів цієї галактики.

СПЕКТРИ ТА ПАРАМЕТРИ МОДЕЛЕЙ АТМОСФЕР

Спектральні спостереження PMMR23 та інших червоних надгігантів Магелланових хмар були виконані В. Хілл [28, 30] на 3.6-м телескопі Європейської Південної обсерваторії у діапазоні довжин хвиль 500...720 нм з розділенням $R = 30000$ та відношенням сигнал/шум понад 100. На рис. 1 дається фрагмент спектру PMMR23.

Параметри моделі атмосфери були знайдені по лініях поглинання заліза. Порівняння з синтетичним спектром, розрахованим для всього

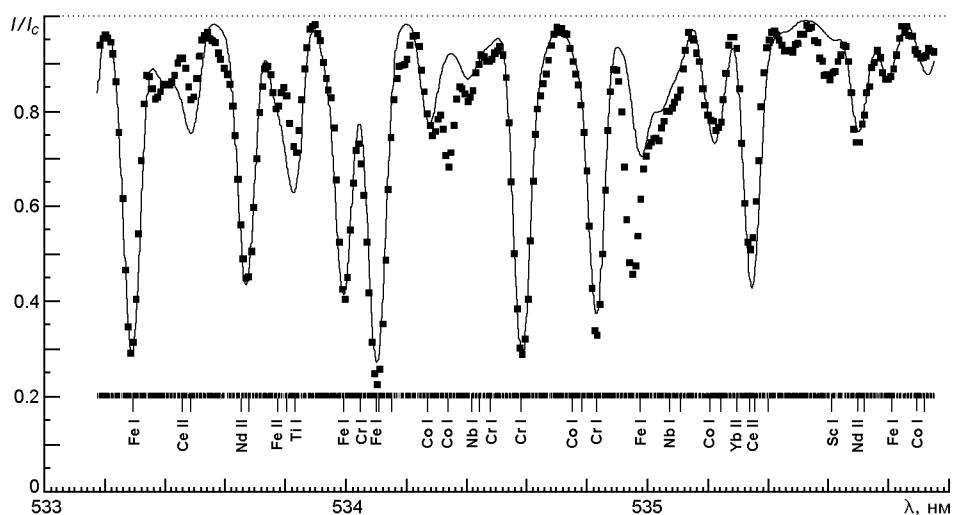


Рис. 1. Фрагмент спектру PMMR23 (квадратики) та синтетичний спектр (лінія). Внизу показано атомні та молекулярні лінії, що використовувались для розрахунків синтетичного спектру. Для частини найсильніших ліній дається їхнє ототожнення

діапазону довжин хвиль, в якому були отримані спостереження, дозволило ототожнити у спектрі PMMR23 69 неблендованих або слабоблендованих ліній поглинання нейтрального заліза і 9 ліній іонізованого. Використовувалися сили осциляторів [13, 38, 39] та сонячні сили осциляторів, знайдені нами по атласу сонячного спектру [10] із застосуванням методики, описаної в роботі [68].

Для першого наближення моделі атмосфер бралися з робіт [9, 38, 39]. Метод описано в роботах [20, 69]. Було проаналізовано моделі в діапазоні ефективних температур $T_{\text{ef}} = 4000 \dots 4400$ К та прискорення вільного падіння $\lg g = 0.0 \dots 0.5$ і відібрано модель з параметрами $T_{\text{ef}} = 4240$ К, $\lg g = 0.12$, $v_{\text{mic}} = 3.1$ км/с та металічністю $[\text{Fe}/\text{H}] = 0.5$, які мало відрізняються від результатів Хілл [28, 30]: $T_{\text{ef}} = 4200$ К, $\lg g = 0.20$, $v_{\text{mic}} = 4.0$ км/с. Ефективна температура та прискорення вільного падіння збігаються у межах похибок. Знайдена нами швидкість мікротурбулентних рухів менша, що може впливати на визначення вмісту хімічних елементів по сильних лініях. Для використаних нами ліній нейтрального заліза збільшення мікротурбулентної швидкості від 3 до 4 км/с дає зменшення середнього вмісту заліза приблизно на 0.1 dex.

З використанням програми ATLAS12 [39] було розраховано індивідуальну модель атмосфери для PMMR23 із знайденими нами параметрами. Значення вмісту хімічних елементів в атмосфері PMMR23 бралися з наших попередніх досліджень [16—19]. Обчислення, виконані з використанням отриманої моделі, дозволили знайти близькі до нуля коефіцієнти кореляції між значеннями вмісту заліза, розрахованого по різних спектральних лініях цього елемента, та оцінками еквівалентних ширин, енергії нижнього рівня і довжин хвиль ліній.

Для аналізу похибок, можливих при визначенні параметрів моделі атмосфери, було обчислено ще два набори модельних параметрів: з ефективною температурою та прискоренням вільного падіння, зміненими на +100 К та +0.2 dex відповідно. Ці три моделі були використані для аналізу вмісту хімічних елементів в атмосфері PMMR23 методом синтетичного спектру.

По профілях неблендованих ліній поглинання заліза було оцінено швидкість обертання PMMR23: $v \sin i = 20$ км/с.

ВМІСТ ХІМІЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ В АТМОСФЕРІ PMMR23

Вміст заліза в атмосфері PMMR23 було знайдено методом моделювання атмосфер з використанням програми Куруца WIDTH9 [39], вміст всіх інших елементів — методом синтетичного спектру. Всі обчислення проводились в ЛТР-наближенні. Застосовувались програма Куруца SYNTHE [39] і програма URAN [66], яка дозволяє проводити обчислення в напівавтоматичному режимі. Відбір неблендованих та

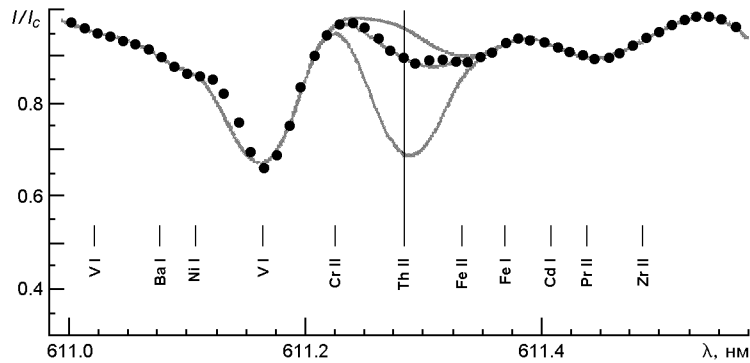


Рис. 2. Спостережувана лінія іонізованого торію 611.2837 нм у спектрі PMMR23 (точки) та три синтетичних спектри, розрахованих для найкращого значення вмісту торію та для двох значень вмісту, які відрізняються від найкращого на 0.5 dex (сірі криві)

слабкоблендованих ліній проводився, як і для ліній заліза, методом порівняння спостережуваного і синтетичного спектрів. Для кожної лінії розрахунки проводились по трьох моделях атмосфер, параметри яких вказані вище. Для того щоб мінімізувати похибки, пов'язані з силами осциляторів, ми намагалися застосовувати порівняння з сонячним спектром. Використовувався атлас сонячного спектру для центра диска Сонця [10]. Детально методика описана в [33, 34, 68].

Рис. 2 показує спостережуваний спектр PMMR23 та синтетичні профілі для лінії іонізованого торію 611.2837 нм.

Табл. 1 містить оцінки параметрів атмосфери PMMR23, отримані методом синтетичного спектру. У перших п'яти графах для ідентифікованих ліній наводяться вхідні дані для розрахунків: довжини хвиль, сили осциляторів $lggf$ з літературними джерелами та енергії E_{low} збудження нижнього рівня. В наступних трьох графах даються значення вмісту елемента в атмосфері PMMR23 (lgN_{23}), в атмосфері Сонця (lgN_{\odot}), та їхня різниця $lgN = lgN_{23} - lgN_{\odot}$ (приймається, що $lgN(H) = 12$). У випадках, коли інформація для сонячного спектру не приводиться, використовувались дані [22, 23].

В дев'ятій і десятій графах для синтетичних спектрів PMMR23 і Сонця наведено відношення R коефіцієнта поглинання в лінії елемента до суми цих коефіцієнтів поглинання для всіх спектральних ліній, які вносять вклад у поглинання на даній довжині хвилі. Для неблендованих ліній ці відносні коефіцієнти поглинання дорівнюють одиниці, для сильно блендованих ліній вони наближаються до нуля.

В наступних двох графах дається глибина r ліній в синтетичних спектрах PMMR23 і Сонця у шкалі, де рівень неперервного спектру дорівнює 1.0. При розрахунку r інструментальний профіль спектрографа та швидкість обертання зорі до уваги не брались.

В останніх двох графах таблиці приведено можливі відхилення $^{(0.2)}$ і $^{(100)}$ вмісту від знайденого значення lgN_{23} при використанні зна-

Таблиця 1. Оцінки вмісту хімічних елементів в атмосфері РММР23

Елемент	λ , нм	lggf, джерело	$E_{\text{іон}}$, eB	lgN ₂₃	lgN _☉	lgN	R ₂₃	R _☉	r ₂₃	r _☉	(0.2)	(000)
Li I	670.7761	-0.009 [39]	0.000	0.153	1.288	-1.135	0.814	0.919	0.099	0.020	-0.109	0.129
C I	658.7610	-1.330 [31]	8.537	7.614		-0.816	0.254		0.011		0.000	0.000
O I	630.0304	-9.710 [2]	0.000	8.029		-0.661	0.994		0.501		0.055	0.006
O I	636.3776	-10.300 [41]	0.020	8.196		-0.494	0.948		0.271		0.092	0.021
Na I	568.2633	-0.700 [35]	2.102	5.714	6.415	-0.701	1.000	1.000	0.774	0.720	0.199	0.349
Na I	615.4226	-1.547 [35]	2.102	5.732	6.299	-0.567	0.943	1.000	0.390	0.352	0.000	0.012
Mg I	571.1088	-1.724 [35]	4.346	6.881	7.617	-0.736	1.000	1.000	0.781	0.725	-0.018	0.115
Al I	669.6023	-1.569 [36]	3.143	5.553	6.342	-0.789	0.898	0.938	0.215	0.308	0.000	0.003
Al I	669.8673	-1.870 [36]	3.143	5.726	6.391	-0.665	0.749	0.993	0.171	0.206	-0.186	-0.135
Si I	566.5555	-2.040 [41]	4.920	6.620	7.549	-0.929	0.769	0.996	0.225	0.393	0.000	0.416
Si I	569.0425	-1.870 [41]	4.930	6.696	7.593	-0.897	0.858	0.976	0.324	0.491	0.000	0.015
Si I	579.3073	-2.060 [41]	4.930	6.731	7.620	-0.889	0.772	0.979	0.254	0.407	-0.065	-0.065
Si I	594.8541	-1.230 [41]	5.082	6.666	7.581	-0.915	0.985	1.000	0.495	0.636	0.000	0.065
Si I	615.5135	-0.400 *	5.619	6.443	7.114	-0.671	0.991	1.000	0.449	0.569	0.047	0.031
Si I	623.7320	-1.130 *	5.614	6.554	7.551	-0.997	0.828	1.000	0.207	0.467	0.060	0.060
Ca I	526.0387	-1.720 [40]	2.521	5.532	6.314	-0.782	0.900	1.000	0.453	0.454	0.108	0.010
Ca I	559.0114	-0.596 [40]	2.521	5.526	6.403	-0.877	0.999	1.000	0.887	0.795	-0.013	0.151
Ca I	615.6023	-2.497 [40]	2.521	5.892	6.329	-0.437	0.992	0.907	0.228	0.117	-0.011	-0.366
Ca I	616.6439	-1.156 [40]	2.521	5.444	6.403	-0.959	0.998	1.000	0.688	0.667	-0.018	0.046
Ca I	671.7681	-0.596 [40]	2.709	5.450	6.421	-0.971	1.000	1.000	0.763	0.703	0.000	0.046
Ca I	679.8479	-2.320 [40]	2.709	5.625	6.143	-0.518	0.954	0.975	0.116	0.077	0.271	-0.032
Sc I	567.1821	0.640 [38]	1.448	2.308		-0.842	0.975		0.659		0.055	0.156
Sc I	568.6847	0.530 [38]	1.440	2.099	2.893	-0.794	0.988	0.972	0.447	0.132	-0.024	0.199
Sc I	619.3666	-2.760 [38]	0.000	2.124		-1.026	0.450		0.071		0.222	0.408
Sc I	621.0658	-1.570 [38]	0.000	2.196	3.052	-0.856	0.936	0.872	0.681	0.045	0.008	0.148
Sc I	641.3324	-2.310 [38]	0.021	2.185	3.267	-1.082	0.827	0.642	0.195	0.013	0.009	-0.006
Sc II	534.2050	-3.140 [38]	1.500	2.353	3.480	-1.127	0.809	0.727	0.051	0.017	-2.203	-0.045
Sc II	552.6790	0.130 [38]	1.768	1.836	3.076	-1.240	0.999	1.000	0.817	0.763	0.075	-0.002
Sc II	568.4202	-1.050 [38]	1.507	2.136	3.151	-1.015	1.000	1.000	0.697	0.477	0.269	0.000
Sc II	660.4601	-1.480 [38]	1.357	2.136	3.368	-1.232	0.989	0.996	0.586	0.416	0.034	0.000
Sc II	627.9753	-1.210 [38]	1.500	1.900	3.103	-1.203	1.000	1.000	0.534	0.354	0.076	-0.009
Ti I	506.2112	-0.464 [38]	2.160	4.288	4.983	-0.695	0.984	0.956	0.541	0.241	-0.018	0.131
Ti I	507.1472	-1.063 [38]	1.460	4.323	5.163	-0.840	0.995	0.982	0.847	0.380	0.010	0.230
Ti I	547.1197	-1.400 [38]	1.443	4.349	4.926	-0.577	0.976	0.981	0.683	0.134	0.023	0.021
Ti I	564.4137	0.030 [38]	2.267	4.220		-0.730	0.998		0.713		0.429	0.630
Ti I	567.5428	-0.160 [38]	2.305	4.216		-0.734	0.885		0.556		0.000	0.289
Ti I	571.3929	-1.074 [40]	2.289	4.313	5.027	-0.714	0.828	0.989	0.145	0.056	-0.050	-0.051
Ti I	576.6330	0.254 [40]	3.294	4.231	5.084	-0.853	0.505	0.988	0.108	0.132	0.018	-0.015
Ti I	590.3317	-2.145 [38]	1.067	4.389	5.081	-0.692	0.989	1.000	0.609	0.084	0.000	-0.095
Ti I	591.8539	-1.460 [38]	1.067	3.719	4.807	-1.088	0.999	0.997	0.619	0.197	-0.006	0.202
Ti I	593.7811	-1.890 [38]	1.067	4.216	4.977	-0.761	0.986	1.000	0.669	0.116	0.030	0.003
Ti I	594.4650	-4.025 [40]	0.000	4.336	5.220	-0.884	0.863	0.748	0.480	0.019	0.047	0.019
Ti I	596.5828	-0.409 [38]	1.879	4.216	4.953	-0.737	0.995	1.000	0.788	0.381	0.000	0.321
Ti I	597.8543	-0.496 [38]	1.873	4.304	4.953	-0.649	0.998	1.000	0.792	0.337	-0.006	0.142
Ti I	598.0824	-2.897 [40]	1.067	4.243	5.051	-0.808	0.476	0.933	0.128	0.015	-0.012	-0.009
Ti I	599.5994	-1.734 [40]	1.879	4.231	5.054	-0.823	0.491	0.835	0.108	0.033	0.003	-0.006
Ti I	603.1677	-4.166 [40]	0.048	4.768	5.333	-0.565	0.993	0.847	0.640	0.016	-0.474	-0.487
Ti I	609.1174	-0.423 [38]	2.267	4.444	5.015	-0.571	0.983	1.000	0.569	0.217	0.024	0.186
Ti I	629.5236	-4.377 [40]	0.048	4.286		-0.664	0.677		0.211		0.510	0.726
Ti I	655.4224	-1.218 [38]	1.443	4.387	5.004	-0.617	0.997	0.862	0.810	0.219	-0.008	0.197
Ti I	655.6062	-1.074 [38]	1.460	4.290	5.001	-0.711	1.000	0.888	0.818	0.273	0.228	0.463
Ti I	691.3135	-0.842 [40]	2.695	4.176		-0.774	0.611		0.055		0.036	0.000
Ti I	706.5207	-2.277 [40]	1.460	4.243	5.233	-0.990	0.618	0.972	0.140	0.037	0.001	-0.001
Ti I	705.0693	-1.140 [40]	2.345	4.170	5.021	-0.851	0.549	0.931	0.083	0.042	0.006	0.297
Ti I	713.8905	-1.590 [38]	1.443	4.274	4.920	-0.646	0.923	0.992	0.516	0.087	0.342	0.567
Ti II	649.1561	-2.070 *	2.061	4.122	5.021	-0.899	0.998	1.000	0.592	0.420	0.048	-0.023
Ti II	655.9588	-2.019 [40]	2.048	3.743	4.749	-1.006	0.996	0.877	0.483	0.324	0.100	-0.035
V I	550.4885	-0.882 [40]	1.711	3.106	3.781	-0.675	0.933	0.835	0.101	0.020	-0.025	0.196

Елемент	λ , нм	lggf, джерело	$E_{\text{іон}}$, eV	lg N_{23}	lg N_{\odot}	lg N	R_{23}	R_{\odot}	r_{23}	r_{\odot}	$\langle^{(0.2)}$	$\langle^{(00)}$
V I	550.7757	0.110 [38]	2.359	2.873	3.456	-0.583	0.550	0.659	0.070	0.022	-0.072	0.312
V I	560.4931	-1.280 [38]	1.043	3.494		-0.436	0.980		0.608		-0.002	0.182
V I	564.6108	-1.190 [38]	1.051	3.472	3.864	-0.392	0.967	0.924	0.649	0.052	0.018	0.223
V I	567.0853	-0.420 [38]	1.081	3.170	3.857	-0.687	1.000	0.998	0.887	0.237	0.020	0.182
V I	572.5641	0.010 [38]	2.365	3.254	3.839	-0.585	0.738	0.991	0.125	0.040	0.051	0.015
V I	573.7059	-0.740 [38]	1.064	3.245	3.876	-0.631	0.998	1.000	0.784	0.133	-0.012	0.198
V I	577.6687	-1.540 [38]	1.081	3.449	3.951	-0.502	0.908	0.947	0.360	0.026	0.050	0.399
V I	605.8139	-1.374 [38]	1.043	3.532		-0.398	0.975		0.576		0.003	0.218
V I	611.1645	-0.715 [38]	1.043	3.411	3.849	-0.438	1.000	1.000	0.886	0.133	0.000	0.213
V I	625.6887	-2.010 [38]	0.275	3.199	3.803	-0.604	0.991	0.880	0.779	0.041	0.019	0.204
V I	653.1415	-0.840 [38]	1.218	3.262	3.880	-0.618	0.995	0.925	0.574	0.080	-0.012	0.074
V I	654.3500	-1.660 [38]	1.195	3.227		-0.703	0.694		0.140		0.003	0.003
V I	660.5967	-1.320 [38]	1.195	3.196	3.797	-0.601	0.833	0.772	0.258	0.024	0.000	0.034
V I	675.3017	-1.660 [38]	1.081	3.646	4.061	-0.415	0.984	0.855	0.426	0.026	0.018	-0.046
V I	676.6519	-1.850 [38]	1.064	3.554	4.195	-0.641	0.736	0.701	0.277	0.024	0.126	-0.188
Cr I	521.4140	-0.740 [38]	3.369	4.900	5.776	-0.876	0.985	1.000	0.234	0.303	-0.009	0.138
Cr I	578.7965	-0.083 [38]	3.322	4.946	5.683	-0.737	0.977	1.000	0.647	0.585	-0.006	0.186
Cr I	653.7929	-4.069 [40]	1.004	5.104	5.851	-0.747	0.904	0.775	0.406	0.043	0.017	0.096
Cr I	663.0005	-3.560 [38]	1.030	4.912	5.704	-0.792	0.979	0.952	0.598	0.090	0.003	0.168
Cr II	551.0702	-2.452 [40]	3.827	4.575	5.667	-1.092	0.918	0.965	0.163	0.206	0.079	-0.014
Cr II	550.3212	-2.306 [40]	4.143	5.021	5.689	-0.668	0.868	0.790	0.230	0.167	0.015	0.000
Co I	533.1452	-1.960 [38]	1.785	4.038	4.666	-0.628	0.925	0.925	0.687	0.154	0.030	0.147
Co I	552.3291	-1.566 [40]	2.328	3.872	4.501	-0.629	0.991	0.920	0.356	0.073	0.010	0.078
Co I	559.0720	-1.870 [38]	2.042	4.086		-0.904	0.987		0.548		0.013	0.117
Co I	564.7234	-1.560 [38]	2.280	4.008	4.847	-0.839	0.980	0.999	0.482	0.194	0.042	0.145
Co I	591.5552	-2.000 [38]	2.137	3.996	4.647	-0.651	0.694	0.779	0.332	0.069	0.000	0.000
Co I	611.6996	-2.490 [38]	1.785	4.338	4.936	-0.598	0.999	0.988	0.541	0.089	0.014	0.131
Co I	649.0343	-2.520 [38]	2.042	4.002	4.774	-0.772	0.828	0.906	0.167	0.035	-0.012	0.294
Co I	663.2433	-2.000 [38]	2.280	4.068	4.987	-0.919	0.792	0.970	0.269	0.104	-0.045	-0.049
Co I	681.4942	-1.700 [38]	1.956	4.047	4.707	-0.660	0.999	1.000	0.666	0.205	-0.051	-0.051
Co I	705.2868	-1.440 [38]	1.956	3.944		-1.046	0.996		0.720		0.000	0.048
Ni I	508.2339	-0.540 [38]	3.658	4.972	6.257	-1.285	0.994	1.000	0.609	0.764	0.003	0.051
Ni I	559.3733	-0.840 [38]	3.898	5.177	6.287	-1.110	0.986	1.000	0.372	0.563	0.013	0.059
Ni I	566.3975	-0.430 [38]	4.538	5.096	6.284	-1.188	0.584	1.000	0.159	0.454	0.000	-0.024
Ni I	584.6986	-3.210 [38]	1.676	5.044	6.050	-1.006	0.997	1.000	0.667	0.335	0.006	0.012
Ni I	608.6276	-0.530 [38]	4.266	5.351	6.305	-0.954	0.947	1.000	0.363	0.515	0.035	0.177
Ni I	611.6175	-0.822 [40]	4.266	5.096	6.210	-1.114	0.706	0.879	0.281	0.492	0.030	0.000
Ni I	617.5360	-0.530 [38]	4.089	5.115	6.305	-1.190	0.986	1.000	0.358	0.585	0.071	0.058
Ni I	632.7593	-3.150 [38]	1.676	5.111	6.284	-1.173	0.982	1.000	0.714	0.496	0.000	0.000
Ni I	636.6476	-1.064 [40]	4.167	5.111	6.314	-1.203	0.298	1.000	0.117	0.313	0.000	0.003
Ni I	653.2871	-3.390 [38]	1.935	5.314	6.269	-0.955	0.983	1.000	0.498	0.230	-0.111	-0.160
Ni I	658.6308	-2.810 [38]	1.951	5.205	6.254	-1.049	0.999	0.993	0.714	0.507	0.022	0.127
Ni I	677.2313	-0.980 [38]	3.658	5.237	6.296	-1.059	0.984	1.000	0.468	0.549	0.028	0.105
Ni I	691.4559	-2.270 [38]	1.951	5.371	6.225	-0.854	1.000	1.000	0.858	0.673	0.030	0.091
Ni I	702.8952	-3.175 [40]	1.935	4.844	5.818	-0.974	0.923	0.997	0.352	0.147	0.043	0.131
Ni I	703.0006	-1.730 [38]	3.542	5.044	6.311	-1.267	0.960	1.000	0.136	0.273	0.003	0.009
Ni I	706.2950	-3.500 [38]	1.951	5.149	6.299	-1.150	0.840	0.976	0.329	0.191	-0.096	-0.004
Ni I	711.0892	-2.980 [38]	1.935	4.883	6.263	-1.380	0.869	0.993	0.480	0.420	0.115	0.119
Ni I	712.2191	-0.170 [31]	3.542	5.001	6.213	-1.212	0.997	1.000	0.701	0.709	-0.005	0.051
Cu I	570.0237	-2.312 [39]	1.642	2.930	3.666	-0.736	0.907	0.990	0.628	0.192	0.000	0.006
Y I	622.2578	-1.700 [39]	0.000	1.696	2.449	-0.753	0.963	0.685	0.236	0.010	0.006	0.246
Y I	563.0130	0.150 [39]	1.356	1.364	2.334	-0.970	0.693	0.716	0.060	0.024	0.000	0.006
Y II	540.2774	-0.510 [39]	1.839	1.364	2.179	-0.815	0.992	1.000	0.531	0.230	0.185	0.003
Y II	572.8890	-1.120 [39]	1.839	1.359	2.191	-0.832	0.914	0.962	0.240	0.070	0.057	0.051
Y II	679.5414	-1.190 [39]	1.738	1.292	2.206	-0.914	0.973	0.987	0.220	0.073	0.072	-0.003
Y II	511.9112	-1.360 [39]	0.992	1.230	2.274	-1.044	0.992	0.955	0.616	0.264	0.080	0.008
Y II	528.9815	-1.850 [39]	1.033	1.520	2.244	-0.724	0.976	0.974	0.480	0.087	0.069	0.004
Zr I	538.5151	-0.710 [39]	0.519	1.709	2.430	-0.721	0.971	0.692	0.454	0.028	0.028	0.320

Елемент	λ , нм	lggf, джерело	$E_{\text{іонв}}$, eB	lgN ₂₃	lgN _○	lgN	R ₂₃	R _○	r ₂₃	r _○	^(0.2)	⁽⁰⁰⁾
Zr I	568.0920	-1.700 [39]	0.543	1.874	2.737	-0.863	0.579	0.921	0.088	0.005	-0.100	-0.049
Zr I	588.5602	-2.114 [49]	0.071	2.058	3.232	-1.174	0.918	0.658	0.281	0.020	-0.010	0.194
Zr I	595.5366	-2.330 [39]	0.000	2.537	3.309	-0.772	0.982	0.974	0.533	0.018	-0.001	-0.143
Zr I	614.0535	-1.410 [39]	0.519	1.807		-0.773	0.655		0.161		-0.026	-0.004
Zr I	644.5747	-0.830 [39]	0.999	1.736	2.964	-1.228	0.701	0.894	0.094	0.024	0.052	0.010
Zr I	699.0869	-1.220 [39]	0.623	1.774		-0.806	0.651		0.167		0.181	0.017
Zr I	709.7774	-0.570 [39]	0.687	1.888		-0.692	0.990		0.530		0.003	0.229
Zr I	716.9130	-0.880 [39]	0.730	1.749	2.622	-0.873	0.493	0.540	0.223	0.018	0.012	0.024
Nb I	513.4737	-1.394 [49]	0.019	1.138		-0.322	0.768		0.241		0.040	0.020
Nb I	531.8598	-1.130 [39]	0.197	1.041		-0.419	0.888		0.191		0.052	0.032
Nb I	534.4158	-0.730 [39]	0.348	1.290		-0.170	0.956		0.401		-0.124	0.176
Nb I	566.4696	-1.580 [39]	0.142	0.946		-0.514	0.693		0.077		0.086	-0.064
Mo I	557.0444	-0.337 [39]	1.335	1.353	1.976	-0.623	0.944	0.793	0.336	0.033	-0.011	-0.092
Mo I	603.0644	-0.523 [39]	1.531	1.219	2.137	-0.918	0.523	0.767	0.104	0.020	0.024	0.005
Ru I	530.9265	-1.180 [39]	0.928	1.528	2.107	-0.579	0.966	0.703	0.196	0.011	-0.224	-0.003
Ba I	601.9465	-0.100 [39]	1.120	2.303		0.123	0.539		0.053		0.006	0.179
Ba I	659.5323	0.150 [39]	1.120	2.294		0.114	0.878		0.090		0.006	0.012
Ba I	667.5267	-0.150 [39]	1.143	2.346		0.166	0.782		0.050		0.000	0.000
La II	529.0818	-1.750 [39]	0.000	0.924		-0.176	0.998		0.803		0.086	0.053
La II	580.8313	-2.200 [39]	0.000	0.919	1.170	-0.251	0.995		0.581	0.028	0.106	0.041
La II	586.3691	-1.590 [39]	0.927	1.189	1.216	-0.027	0.976	0.794	0.362	0.012	-0.073	-0.073
La II	593.6210	-2.060 [39]	0.173	0.815	1.201	-0.386	1.000	0.948	0.459	0.021	0.080	0.032
La II	610.0374	-1.780 [39]	0.709	1.064		-0.036	0.979		0.346		0.000	0.000
La II	632.0376	-1.610 [39]	0.173	1.016		-0.084	0.999		0.758		0.048	0.048
La II	639.0477	-1.450 [39]	0.321	0.810	1.165	-0.355	0.998	0.995	0.653	0.053	0.055	0.039
La II	667.1404	-2.030 [39]	0.403	0.873		-0.227	0.978		0.326		0.075	0.023
La II	677.4268	-1.820 [39]	0.126	0.936		-0.164	0.984		0.662		0.092	0.038
La II	680.8885	-2.430 [39]	0.126	0.945		-0.155	0.979		0.352		0.065	0.019
La II	683.4099	-2.180 [39]	0.244	0.774		-0.326	0.937		0.309		0.098	0.040
La II	683.7904	-2.280 [39]	0.321	0.846		-0.254	0.978		0.248		0.073	0.015
La II	706.6198	-1.940 [39]	0.000	1.270		0.170	0.999		0.798		0.085	0.069
Ce II	535.4577	-1.570 [3]	1.206	1.590		0.010	0.823		0.114		0.024	0.012
Ce II	588.4729	-1.540 [3]	1.177	1.556		-0.024	0.884		0.120		-0.006	-0.006
Ce II	593.3582	-1.770 [3]	0.327	1.405	1.641	-0.236	0.998	0.808	0.445	0.012	0.082	0.041
Ce II	556.1444	-0.860 [3]	1.458	1.532		-0.048	0.955		0.214		0.042	0.009
Ce II	595.9688	-0.440 [3]	1.626	1.544		-0.036	0.918		0.299		0.000	0.000
Ce II	602.9150	-1.730 [3]	0.875	1.393		-0.187	0.952		0.130		0.151	0.037
Ce II	604.3373	-0.500 [3]	1.206	1.396	1.576	-0.180	0.989	1.000	0.471	0.026	0.076	0.007
Ce II	616.7840	-1.040 [3]	1.456	1.337		-0.243	0.919		0.101		0.074	0.010
Ce II	620.1836	-1.950 [3]	0.417	1.611		0.031	0.985		0.385		0.000	0.018
Ce II	629.9482	-0.430 [3]	1.895	1.544		-0.036	0.861		0.166		0.006	0.000
Ce II	662.8869	-0.850 [3]	1.645	1.454		-0.126	0.798		0.113		0.090	0.033
Ce II	668.3537	-2.500 [3]	0.561	1.602		0.022	0.721		0.097		-0.046	-0.046
Ce II	717.4993	-1.870 [3]	0.553	1.487		-0.093	0.954		0.263		0.045	0.045
Pr II	529.2020	-0.266 [39]	0.630	0.513		-0.207	1.000		0.707		0.027	-0.039
Pr II	532.2772	-0.315 [39]	0.483	0.514	0.673	-0.159	0.999	0.929	0.769	0.057	0.077	0.032
Pr II	557.1828	-1.313 [39]	0.508	0.616		-0.104	0.982		0.289		0.000	0.021
Pr II	560.5642	-0.571 [39]	0.960	0.492		-0.228	0.989		0.297		0.072	0.000
Pr II	560.8931	-1.814 [39]	0.216	0.576		-0.144	0.690		0.221		0.034	0.034
Pr II	585.0644	-1.280 [39]	0.422	0.521		-0.199	0.956		0.314		0.083	0.083
Pr II	608.7533	-0.618 [39]	1.121	0.454	0.726	-0.272	0.891	0.605	0.173	0.008	0.071	0.038
Pr II	656.6762	-1.721 [39]	0.216	0.630		-0.090	0.969		0.285		0.016	0.015
Pr III	619.5620	-1.070 [45]	0.000	0.573		-0.137	0.582		0.031		0.021	0.021
Nd II	528.7133	-1.300 [39]	0.745	1.232		-0.188	0.975		0.444		0.085	0.030
Nd II	531.1453	-0.420 [11]	0.986	1.251		-0.169	0.985		0.723		0.120	0.020
Nd II	541.6374	-0.930 [39]	0.859	1.295	1.462	-0.167	0.997	0.953	0.595	0.031	0.082	0.019
Nd II	543.0780	-0.550 [39]	1.225	1.350		-0.070	0.996		0.560		0.089	0.023

Закінчення табл. 1

Елемент	λ , нм	$\lg gf$, джерело	E_{low} , eВ	$\lg N_{23}$	$\lg N_{\odot}$	$\lg N$	R_{23}	R_{\odot}	r_{23}	r_{\odot}	$r_{\odot}^{(0.2)}$	$r_{\odot}^{(0.0)}$
Nd II	544.2264	-0.910 [39]	0.680	1.201	1.549	-0.348	0.998	0.928	0.680	0.058	0.076	0.028
Nd II	548.5696	-0.120 [11]	1.264	1.200		-0.220	0.999		0.658		0.074	0.004
Nd II	561.4283	-1.060 [39]	1.044	1.109		-0.311	0.843		0.289		0.081	0.021
Nd II	574.4777	-1.030 [39]	0.986	1.356	1.540	-0.184	0.979	0.777	0.472	0.023	0.030	0.031
Nd II	576.4212	-1.280 [39]	1.357	1.374	1.617	-0.243	0.999	0.789	0.150	0.006	0.006	0.000
Nd II	620.8007	-0.850 [39]	1.773	1.259	1.419	-0.160	0.874	0.803	0.094	0.005	0.098	-0.025
Nd II	642.8645	-2.280 [39]	0.205	1.462	1.654	-0.192	0.974	0.579	0.424	0.010	-0.036	-0.036
Nd II	553.9220	-1.460 [39]	0.745	1.389		-0.031	0.881		0.437		-0.016	0.013
Nd II	577.0489	-1.030 [39]	1.081	1.386	1.516	-0.130	0.976	0.769	0.419	0.017	0.036	0.022
Nd II	584.2366	-0.600 [39]	1.282	1.374	1.543	-0.169	0.997	0.945	0.495	0.031	0.121	0.006
Nd II	586.5027	-0.830 [39]	1.410	1.374	1.568	-0.194	0.990	0.779	0.292	0.015	0.000	-0.094
Nd II	588.2786	-1.690 [39]	0.559	1.374	1.580	-0.206	0.955	0.804	0.435	0.014	0.006	0.021
Nd II	590.6624	-1.330 [39]	0.859	1.374		-0.046	0.990		0.408		0.000	0.000
Nd II	600.9304	-2.170 [39]	0.380	1.380		-0.040	0.929		0.310		0.270	0.225
Nd II	651.4959	-2.360 [39]	0.182	1.429		0.009	0.922		0.377		0.015	0.015
Nd II	652.3138	-1.980 [39]	0.933	1.380		-0.040	0.711		0.109		0.082	0.060
Nd II	653.9924	-1.900 [39]	0.745	1.253		-0.167	0.994		0.165		0.121	0.030
Nd II	654.9525	-2.540 [39]	0.064	1.444		0.024	0.974		0.379		0.124	0.036
Nd II	655.3052	-1.780 [39]	0.859	1.183		-0.237	0.782		0.134		0.063	0.024
Nd II	659.1430	-2.510 [39]	0.205	1.386		-0.034	0.938		0.264		0.000	0.012
Nd II	681.6004	-1.920 [39]	0.745	1.420		0.000	0.982		0.215		0.006	0.006
Nd II	703.7336	-1.770 [39]	0.471	1.420		0.000	0.972		0.466		0.000	0.000
Nd II	712.9359	-2.140 [39]	0.182	1.359		-0.061	0.892		0.456		0.192	0.234
Sm II	578.7027	-0.246 [39]	1.687	0.947		-0.013	0.864		0.296		0.036	0.057
Sm II	583.6325	-1.872 [39]	0.998	1.273		0.313	0.930		0.142		0.070	0.006
Sm II	596.8827	-1.539 [39]	1.462	1.523	1.056	0.467	0.968	0.239	0.138	0.001	-0.060	0.006
Sm II	648.7647	-1.969 [39]	1.166	1.053		0.093	0.632		0.045		0.059	0.340
Sm II	669.3555	-1.089 [39]	1.687	1.010		0.050	0.757		0.064		0.027	0.042
Sm II	677.8663	-1.758 [39]	1.262	1.056		0.096	0.427		0.055		0.299	0.000
Sm II	684.4702	-1.529 [39]	1.359	1.234		0.274	0.258		0.098		0.137	-0.330
Sm II	702.0403	-1.517 [39]	1.166	1.580	1.041	0.539	0.935	0.593	0.296	0.002	0.058	0.012
Eu II	643.7640	-0.276 [39]	1.320	0.248		-0.272	0.953		0.394		0.066	0.002
Eu II	664.5064	0.204 [39]	1.380	0.229		-0.291	0.998		0.552		0.076	0.001
Eu II	707.7088	-0.638 [39]	1.250	0.379	0.637	-0.258	0.963	0.963	0.319	0.024	0.064	0.022
Gd II	573.3852	-0.893 [39]	1.372	1.321	1.291	0.030	0.929	0.732	0.282	0.009	-0.011	-0.005
Gd II	584.0457	-1.023 [39]	1.598	1.243	1.107	0.136	0.975	0.863	0.112	0.003	0.015	0.018
Gd II	608.0641	-0.926 [39]	1.727	1.319	1.187	0.132	0.974	0.614	0.113	0.003	0.052	-0.025
Gd II	628.9943	-0.272 [39]	2.221	1.310		0.240	0.658		0.118		0.006	0.006
Dy II	619.6234	-1.287 [39]	1.946	1.286		0.186	0.415		0.044		0.070	0.034
Dy II	689.9336	-0.940 [39]	1.841	1.549		0.449	0.991		0.188		0.004	-0.090
Er II	541.4631	-2.499 [39]	0.000	1.176	1.175	0.001	0.980	0.502	0.516	0.009	0.070	0.033
Lu II	598.3866	-1.150 [3]	1.463	0.280		0.180	0.990		0.466		0.007	-0.055
Hf I	555.2122	-1.410 [39]	0.699	1.014		0.164	0.624		0.084		0.006	0.006
Hf I	618.5125	-2.480 [39]	0.000	1.014		0.164	0.901		0.107		-0.018	0.006
Hf I	678.9279	-1.810 [39]	0.566	1.066		0.216	0.604		0.071		0.018	0.018
Hf I	713.1816	-1.690 [39]	0.000	0.867		0.017	0.906		0.400		0.031	0.147
Hf II	675.4609	-1.830 [54]	1.780	1.020		0.170	0.674		0.043		0.093	0.006
Os I	572.1931	-2.660 [39]	0.638	1.424		0.024	0.798		0.137		0.018	0.006
Tl I**	535.0420	-0.218 [49]	0.966	1.074		0.174	0.458		0.209		0.021	0.015
Th II	598.9045	-1.414 [53]	0.189	0.142		0.122	0.981		0.483		0.025	-0.116
Th II	604.4433	-1.860 [53]	0.514	0.264		0.244	0.887		0.126		0.073	-0.085
Th II	611.2837	-1.832 [53]	0.231	0.225		0.205	0.957		0.263		0.039	0.039
Th II	699.3037	-1.572 [53]	0.868	0.237		0.217	0.849		0.080		0.114	0.061
U II**	565.4397	-1.516 [52]	1.055	-0.262		0.278	0.807		0.017		0.033	-0.002
U II**	587.0930	-2.165 [54]	0.670	-0.310		0.230	0.332		0.011		0.000	0.045

* — Сонячні сили осциляторів, це дослідження.

** — Верхня межа вмісту.

Таблиця 2. Середні значення вмісту хімічних елементів в атмосфері PMMR23

Z, елемент	n	lgN ₂₃	lgN ₂₃ ^(0.2)	lgN ₂₃ ⁽⁰⁰⁰⁾	lgN	lgN ^(0.2)	lgN ⁽⁰⁰⁰⁾	lgN [23]	n	lgN ₂₃ [24]
3 Li I	1	0.15	0.04	0.28	-1.13	-1.24	-1.00			0.10
6 C I	1	7.61	7.61	7.61	-0.81	-0.81	-0.81			7.63
7 N I										7.65
8 O I	2	8.10(09)	8.18(10)	8.12(09)	-0.58(08)	-0.50(10)	-0.56(09)			8.05
11 Na I	2	5.72(01)	5.82(09)	5.90(16)	-0.63(07)	-0.53(03)	-0.45(10)	-0.55(09)	3	
12 Mg I	1	6.88	6.86	6.99	-0.73	-0.75	-0.62	-0.75(07)	2	
13 Al I	2	5.64(08)	5.54(01)	5.57(02)	-0.72(06)	-0.81(03)	-0.79(01)	-0.71(07)	2	
14 Si I	6	6.61(10)	6.62(07)	6.70(17)	-0.88(10)	-0.87(11)	-0.79(16)	-0.72(12)	5	
20 Ca I	6	5.58(15)	5.63(19)	5.55(06)	-0.75(21)	-0.70(28)	-0.78(13)	-0.72(39)	4	
21 Sc I	5	2.18(07)	2.23(11)	2.36(12)	-0.92(11)	-0.86(11)	-0.74(18)			
Sc II	5	2.07(19)	1.72(80)	2.06(17)	-1.16(09)	-1.51(92)	-1.17(08)	-0.90(23)	5	
22 Ti I	24	4.27(17)	4.32(20)	4.43(25)	-0.75(13)	-0.70(22)	-0.59(29)	-0.61(23)	7	
Ti II	2	3.93(19)	4.00(16)	3.90(20)	-0.94(05)	-0.87(03)	-0.97(06)			
23 V I	16	3.31(19)	3.33(22)	3.45(20)	-0.55(11)	-0.54(11)	-0.41(20)			
24 Cr I	4	4.96(08)	4.96(09)	5.11(06)	-0.78(06)	-0.78(06)	-0.64(07)	-0.87(36)	3	
Cr II	2	4.80(22)	4.84(19)	4.79(23)	-0.88(22)	-0.83(18)	-0.88(22)			
26 Fe I	69	6.92(12)	6.92(12)	7.02(13)	-0.58(12)	-0.58(12)	-0.48(13)	-0.74(21)	60	
Fe II	9	6.91(20)	7.01(20)	6.83(20)	-0.59(20)	-0.49(20)	-0.67(20)	-0.70(19)	10	
27 Co I	10	4.03(11)	4.03(12)	4.12(16)	-0.76(15)	-0.76(15)	-0.67(18)			
28 Ni I	18	5.11(14)	5.12(13)	5.16(15)	-1.11(13)	-1.10(13)	-1.07(16)	-1.04(26)	10	
29 Cu I	1	2.93	2.93	2.94	-0.73	-0.73	-0.72			
39 Y I	2	1.53(16)	1.53(17)	1.65(29)	-0.86(11)	-0.86(11)	-0.73(23)			
Y II	5	1.35(10)	1.44(11)	1.36(10)	-0.86(11)	-0.77(12)	-0.85(11)	-0.85(21)	2	
40 Zr I	9	1.90(25)	1.91(24)	1.96(22)	-0.87(18)	-0.86(19)	-0.81(24)			
41 Nb I	4	1.10(13)	1.11(06)	1.14(21)	-0.35(12)	-0.34(06)	-0.31(21)			
42 Mo I	2	1.28(07)	1.29(05)	1.24(02)	-0.76(15)	-0.76(13)	-0.81(10)			
44 Ru I	1	1.52	1.30	1.52	-0.57	-0.79	-0.57			
56 Ba I	3	2.31(02)	2.31(02)	2.37(08)	0.13(02)	0.13(02)	0.19(08)			
Ba II							0.57(24)		2	
57 La II	13	0.95(14)	1.01(12)	0.97(14)	-0.17(15)	-0.11(14)	-0.14(15)	-0.26(16)	2	
58 Ce II	13	1.49(09)	1.53(05)	1.50(08)	-0.08(09)	-0.04(06)	-0.07(08)	-0.49(10)	4	
59 Pr II	8	0.54(06)	0.58(04)	0.56(07)	-0.17(06)	-0.12(04)	-0.15(07)			
Pr III	1	0.57	0.59	0.59	-0.13	-0.11	-0.11			
60 Nd II	27	1.33(09)	1.39(10)	1.36(11)	-0.13(10)	-0.07(12)	-0.10(13)	0.07(13)	3	
62 Sm II	8	1.21(22)	1.28(21)	1.22(24)	0.22(19)	0.30(18)	0.24(21)			
63 Eu II	3	0.28(07)	0.35(06)	0.29(08)	-0.27(02)	-0.20(01)	-0.26(03)	-0.23	1	
64 Gd II	4	1.29(03)	1.31(04)	1.29(02)	0.13(07)	0.15(08)	0.13(08)			
66 Dy II	2	1.41(13)	1.45(10)	1.38(07)	0.31(13)	0.35(10)	0.28(07)			
68 Er I	1	1.17	1.24	1.20	0.00	0.07	0.03			
71 Lu II	1	0.28	0.29	0.22	0.18	0.19	0.12			
72 Hf I	4	0.99(07)	0.99(07)	1.03(03)	0.13(08)	0.14(07)	0.18(03)			
72 Hf II	1	1.02	1.11	1.03	0.17	0.26	0.18			
76 Os I	1	1.42	1.44	1.43	0.02	0.04	0.03			
81 Tl I*	1	1.07	1.09	1.09	0.17	0.19	0.19			
90 Th II	4	0.21(04)	0.28(07)	0.19(10)	0.19(04)	0.26(07)	0.17(10)			
92 U II*	2	-0.28(02)	-0.27(04)	-0.26(00)	0.25(02)	0.27(04)	0.27(00)			

* — Верхня межа вмісту.

чення прискорення вільного падіння, зміненого на +0.2 dex, або ефективної температури — на +100 K відповідно.

У табл. 2 для ідентифікованих ліній наводиться атомний номер Z, кількість n вимірювань. У наступних шести графах приведено середні

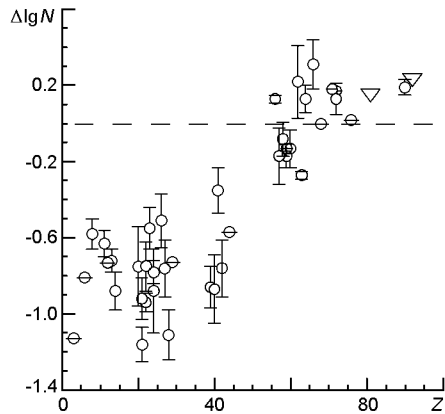


Рис. 3. Відносний вміст $\lg N$ хімічних елементів Z в атмосфері PMMR23. Штрихова лінія — вміст хімічних елементів в атмосфері Сонця. Трикутники показують верхню межу відносного вмісту

абсолютні та відносні значення вмісту елементів в атмосфері PMMR23 для трьох моделей атмосфер ($\lg N_{23}$, $\lg N_{23}^{(0.2)}$, $\lg N_{23}^{(100)}$, $\lg N$, $\lg N^{(0.2)}$ та $\lg N^{(100)}$). В дужках наведено останні знаки середньої квадратичної помилки.

В останніх трьох графах для порівняння наведено оцінки відносного та абсолютного вмісту деяких елементів, отримані в роботах [28, 30] на основі того ж спектрального матеріалу. Видно, що ці оцінки збігаються з нашими оцінками у межах 0.2 dex. Найбільшими є розбіжності для барію (0.42 dex) і церію (0.41 dex).

Оцінки вмісту барію в роботі [28] отримано по сильних лініях іонізованого барію, еквівалентні ширини яких перевищують 0.05 nm, тому вони не можуть бути достатньо надійними. В нашому дослідженні використано лінії нейтрального барію, з еквівалентними ширинами, меншими за 0.01 nm, тому можна очікувати, що наші оцінки більш достовірні.

Вміст церію у роботі [28] знайдено по чотирьох лініях, в нашій роботі — по 13 лініях. Тільки одна лінія, а саме лінія 604.3373 nm, була спільною для обох досліджень. При використанні однакового вмісту церію в атмосфері Сонця і однакових параметрів атмосфери для PMMR23 оцінки [28] відрізняються лише на 0.17 dex від наших. Це дозволяє висловити припущення, що причиною різниці вмісту церію можуть бути різні набори ліній і що надійність результату збільшується для ширшого списку ліній.

Табл. 1 і 2 містять дані про вміст 35 хімічних елементів в атмосфері PMMR23, ще для двох елементів (Tl і U) вказано верхню межу вмісту. Рис. 1 порівнює синтетичний спектр, розрахований із значеннями вмісту елементів із табл. 2, із спостережуваним спектром.

На рис. 3 показано поширеність хімічних елементів в атмосфері PMMR23 відносно атмосфери Сонця. Видно, що вміст елементів з атомними номерами $Z \geq 56$ вищий на 0.6...1.0 dex відносно вмісту елементів групи заліза.

ПРОФІЛІ ЛІНІЇ ВОДНЮ H γ У СПЕКТРАХ ЧЕРВОНИХ НАДГІГАНТІВ МАГЕЛЛАНОВИХ ХМАР

На рис. 4 показано профілі лінії водню H γ у спектрі PMMR23 та у спектрах інших червоних надгігантів Магелланових Хмар. Використано спектральні спостереження [28, 30], описані раніше. Спектри RM 1-390 і RM 1-667 належать надгігантам Великої Магелланової Хмари. Спектри на рис. 4, б належать чотирьом червоним надгігантам Малої Магелланової Хмари (PMMR27, PMMR144, PMMR102 і PMMR48). На них можна помітити емісію в крилах лінії водню, найбільшу для PMMR27 та PMMR48. Раніше емісії такого типу у спектрах зір Магелланових Хмар не досліджувалися.

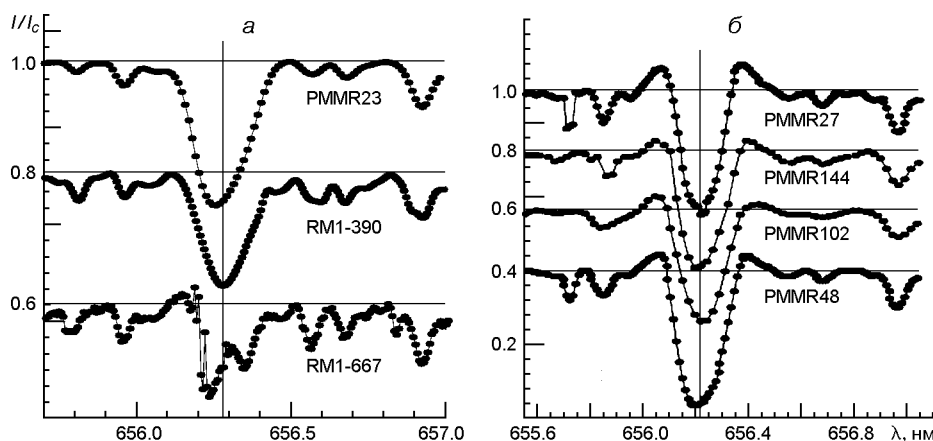


Рис. 4. Лінія водню H γ у спектрах червоних надгігантів Магелланових Хмар: а — зорі PMMR23 (MMX) та RM 1-390 і RM 1-667 (BMX), б — високошвидкісні надгіганти MMX PMMR27, PMMR144, PMMR102 і PMMR48. Спектри різних зір для зручності зсунуто на 0.2 одиниці вздовж вертикальної осі. Горизонтальні лінії — рівень неперервного спектру

Всі чотири зорі, що приводяться на рис. 4, б, входять до групи високошвидкісних зір MMX, які були досліджені в роботі [44]. Наявні спектральні спостереження не дають відповіді на питання про те, чи всі зорі цієї групи мають емісії в крилах лінії водню, і необхідні додаткові спостереження.

Кореляції між променевими швидкостями міжзоряного водню та променевими швидкостями надгігантів в MMX досліджено в роботі [47]. Було знайдено, що зорі з високими променевими швидкостями розташовані в частинах MMX з підвищеною швидкістю потоків міжзоряного водню.

Емісія в лінії водню не спостерігається у спектрах трьох надгігантів, показаних на рис. 4, а, серед яких і PMMR23, яка не входить до групи високошвидкісних зір MMX.

АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ

Рис. 5 порівнює вміст важких елементів в атмосфері PMMR23 з кривими поширеності ізотопів елементів r - та s -процесів в атмосфері Сонця. Більшість елементів з атомними номерами $Z \leq 56$ непогано описуються сонячними кривими. Винятком є лише європій.

Значні відхилення від сонячного співвідношення вмісту елементів спостерігаються для атомних номерів $Z = 39 \dots 44$, вміст цих елементів менший, ніж можна було очікувати. Зауважимо, що згадані елементи синтезуються переважно в s -процесі.

PMMR23 є червоним надгігантом. Згідно з сучасною теорією еволюції зір червоні надгіганти — масивні об'єкти, що швидко еволюціонують і вже залишили головну послідовність. Вміст хімічних елементів в атмосфері PMMR23 віддзеркалює вміст міжзоряного газу, з якого була створена ця зоря. Це дозволяє стверджувати, що та частина ММХ, де проходило формування цього надгіганта, була збагачена елементами r - та s -процесів з атомними номерами, більшими за $Z = 44$.

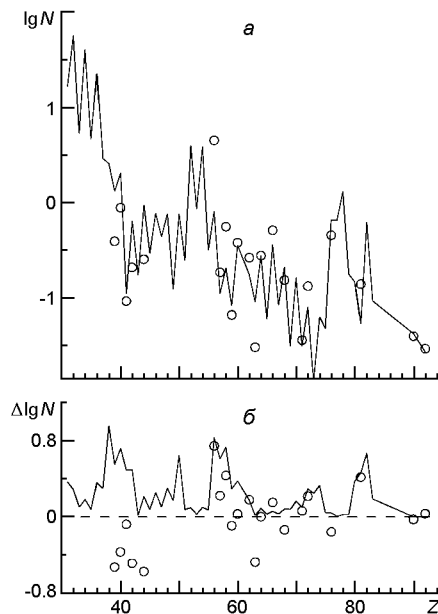
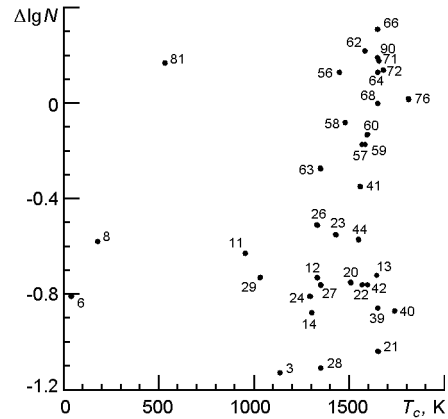


Рис. 5: *a* — апроксимація вмісту важких елементів в атмосфері PMMR23 (кружки) кривою поширеності ізотопів r -процесу в атмосфері Сонця в шкалі $\lg N(\text{Si}) = 10^6$ [60] (лінія). Для зручності значення абсолютного вмісту $\lg N$ всіх елементів в атмосфері PMMR23 зсунуто вздовж вертикальної осі до нульової різниці для гадолінію ($Z = 64$); *б* — відхилення $\lg N$ вмісту елементів в атмосфері PMMR23 від поширеності ізотопів r -процесу [60] (штрихова лінія — вміст ізотопів s -процесу в атмосфері Сонця [60])

Як можна пояснити дефіцит вмісту елементів з атомними номерами $Z = 39 \dots 44$? На рис. 6 показано відносний вміст елементів в атмосфері PMMR23 в залежності від температури конденсації цих елементів.

Лінії хімічних елементів (за виключенням барію) з температурою конденсації, більшою за 1000 К, та відносним вмістом, більшим за 0.4 (в атмосфері PMMR23), зазвичай не спостерігаються у спектрах зір типу Vo , або фіксується дефіцит їхнього вмісту. Якщо не розглядати ці елементи, то рис. 6 показує невеликий тренд до зменшення

Рис. 6. Відносний вміст $\lg N = \lg N_{23} - \lg N_{\odot}$ хімічних елементів в атмосфері PMMR23 в залежності від температури їхньої конденсації T_c [43]. Хімічні елементи позначені атомними номерами



відносного вмісту елементів із збільшенням температури конденсації.

Коефіцієнт кореляції близький до нуля (-0.16 ± 0.22), і не дозволяє стверджувати, що будь-яке пояснення цього тренду дозволить зрозуміти основні процеси, що можуть відбуватися в атмосфері PMMR23. Більш вірогідним може бути комбінація декількох фізичних ефектів, один з яких обумовлює цю невелику кореляцію.

Зменшення відносного вмісту зі збільшенням температури конденсації є найважливішою ознакою об'єктів типу VoO . Воно пояснюється механізмом розділення газу та пилу в навколосоряній оболонці та тиском світлового потоку зорі на частинки пилу з тугоплавких елементів, наслідком якого є дефіцит хімічних елементів з великими температурами конденсації. Ці елементи конденсуються у пилинки на відносно невеликих висотах над фотосферою, а потім ці частинки пилу виштовхуються світловим потоком зорі, який не діє на атоми елементів з малим значенням температури конденсації. Такий механізм було запропоновано в роботах [64, 65] для пояснення кривих поширеності хімічних елементів в атмосферах об'єктів типів VoO та RV Tau і зір з екстремально малим вмістом елементів, важчих за гелій.

Температури конденсації досліджених нами елементів з атомними номерами $Z = 39 \dots 44$ більші за 1000 K, і описаний механізм розділення газу та пилу може зменшувати їхній відносний вміст в атмосфері PMMR23.

Слід зауважити, що досі не досягнуто розуміння феномену зір типу VoO . В роботі [51] показано, що жоден із запропонованих фізичних механізмів не здатний пояснити всі спостереження, і необхідний подальший розгляд цієї проблеми. Найбільш вірогідним є наявність декількох груп зір, для кожної з яких важливим є лише один з фізичних ефектів, що розглядаються для зір типу VoO .

Відносний вміст $\lg N$ хімічних елементів в атмосфері PMMR23 в залежності від значення потенціалу другої іонізації показано на рис. 7. Спостерігається дефіцит відносного вмісту деяких елементів з потенціалами другої іонізації, близькими до потенціалу іонізації водню ($\chi = 13.6 \text{ eV}$). Вперше це було встановлено Грінстейном [21] в атмосферах металічних зір. Поясненням можуть бути реакції обміну

зарядом між атомами водню та атомами інших хімічних елементів, більшість яких вже перебувають у іонізованому стані в зоряних атмосферах. Було вказано на можливість резонансного підсилення ефективності реакцій обміну зарядом між атомами водню і першими іонами інших хімічних елементів, другий потенціал іонізації яких близький до потенціалу іонізації водню. Хавнс [24—26] запропонував гіпотезу, згідно з якою джерелом атомів водню може бути потік газу з міжзоряного середовища.

Результатом резонансу в реакціях обміну зарядами між атомами водню з міжзоряного середовища та атомами зоряної атмосфери є додаткова іонізація та підвищення швидкості атомів елементів з потенціалами іонізації, близькими до потенціалу іонізації водню (13.6 eV). Деякі іони з підвищеною швидкістю можуть бути викинуті у міжзоряне середовище.

Наслідком має бути, по-перше, дефіцит елементів з потенціалами іонізації, близькими до 13.6 eV, по-друге — збагачення міжзоряного середовища швидкими іонами вказаних елементів, тобто космічними променями, по-третє — уповільнення швидкості обертання зорі, оскільки в результаті генерації космічних променів зоряна атмосфера поступово втрачає момент імпульсу.

Як було показано в роботах [24—26], густина енергії, вивільненої в результаті зменшення швидкості обертання гарячих пекулярних магнітних зір Галактики, дорівнює густині енергії галактичних космічних променів з енергіями, меншими за 200 MeV.

Більш детальне обговорення можна знайти в роботах [5, 68]. Раніше [33, 34] було показано, що цей ефект спостерігається в атмосферах компонентів подвійних зір з ефективними температурами 5000...7000 K. Потоки газу з навколосоряної оболонки у подвійних системах типу RS CVn уможливають спостереження результатів реакцій обміну зарядами навіть у конвективних атмосферах.

Рис. 7 показує можливість кореляції між відносним вмістом хімічних елементів та потенціалом другої іонізації для елементів з відносним вмістом в межах від 0.4 до 1.1 і потенціалами другої іонізації в

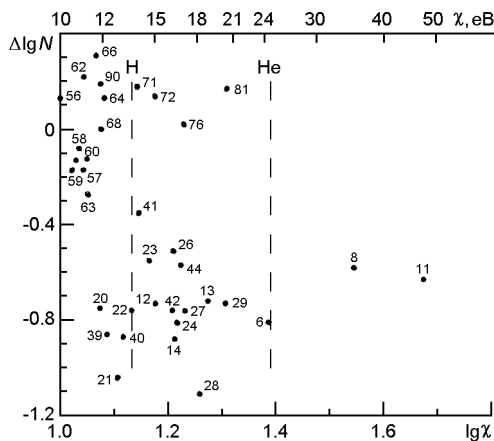


Рис. 7. Відносний вміст $\lg N = \lg N_{23} - \lg N_{\odot}$ хімічних елементів в атмосфері PMMR23 в залежності від потенціалу другої іонізації цих елементів. Вертикальними лініями позначено потенціали іонізації водню та гелію. Хімічні елементи позначені атомними номерами

інтервалі від 11.87 eV (Ca, $Z = 20$) до 20.29 eV (Cu, $Z = 29$). Таких елементів в нашому дослідженні є 16, відповідний коефіцієнт кореляції становить $+0.19 \pm 0.24$. Подібні кореляції були описані в роботах [5, 68] для інших типів зір.

На вміст хімічних елементів, що лежать за межами вказаних інтервалів відносного вмісту та потенціалу іонізації, можуть сильніше впливати інші ефекти. Наприклад, для нікелю ($Z = 28$) не можна виключити вплив розділення газу та пилу, яке було згадане вище.

Грінстейн [21] знайшов, що знайдений ним ефект спостерігається для елементів, потенціал другої іонізації яких перевищує 12 eV. Можливо, це $\epsilon = 12.09$ eV — енергія, що відповідає довжині хвилі лінії водню $L = 102.5$ нм. При 12 eV спостерігається різке зменшення відносного вмісту хімічних елементів на діаграмі потенціал другої іонізації — відносний вміст для PMMR23 та для зір інших типів. Далі дефіцит відносного вмісту зменшується, і при енергії 16 eV зникає [21]. Ці межі інтервалу енергій фактично підтверджені в роботах [5, 68], але верхня межа може бути більшою — 20...21 eV, тобто близькою до енергетичного еквіваленту довжин хвиль двох сильних ліній нейтрального гелію 59.1 та 58.4 нм.

В роботах [5, 68] було показано, що енергія іонізації гелію може грати таку саму роль, як і енергія іонізації водню. Дефіцит відносного вмісту раптово збільшується для елементів з потенціалами другої іонізації понад 21 eV і поступово зменшується для більших енергій для зір з ефективними температурами $7000 < T_{\text{еф}} < 10600$ К. Для зір з ефективними температурами $5900 < T_{\text{еф}} < 7000$ К енергія, близька до 21 eV, відповідає найнижчому відносному вмісту на діаграмі потенціал другої іонізації — відносний вміст ([68], рис. 7). Це можна пояснити ефектом, аналогічним знайденому Грінстейном [21], але зумовленим взаємодією атомів зоряних атмосфер з атомами гелію.

Зауважимо, що потенціали другої іонізації стронцію, цирконію та ніобію ($\epsilon = 12.2, 13.1$ та 14.0 eV відповідно) близькі до потенціалу іонізації водню ($\epsilon = 13.6$ eV). Потенціали другої іонізації молібдену та рутенію ($\epsilon = 16.2$ та 16.8 eV) трохи вищі, але для всіх п'яти хімічних елементів потенціали другої іонізації більші за 12 та менші за 20 eV, що залишає вірогідним зменшення відносного вмісту цих елементів в атмосфері PMMR23 внаслідок впливу акреції водню з міжзоряного середовища.

Це може бути альтернативою давно запропонованій гіпотезі про різну відносну роль r - та s -процесів при синтезі хімічних елементів у Галактиці і у Магелланових Хмарах, яка обговорювалася в багатьох дослідженнях, наприклад в роботі [59]. Однак крива поширеності хімічних елементів в атмосфері лише одного надгіганта ставить нас перед необхідністю аналізу більшої кількості зір у Магелланових Хмарах для підтвердження можливого впливу акреції.

На жаль, пояснення ефекту [21, 24] залишається гіпотетичним. Необхідно щонайменше провести аналіз кривих поширеності хімічних

елементів для зір різних типів та моделювання взаємодії атомів міжзоряного газу і атомів зоряних атмосфер.

Аномалії, зумовлені впливом акреції на зоряні атмосфери, можуть спостерігатися протягом декількох мільйонів років в атмосферах зір з радіативними атмосферами, тобто для ефективних температур, вищих за 6500...7000 К, для об'єктів на головній послідовності [56]. Якщо ми фіксуємо наслідки акреції для зір з нижчою температурою, це може означати, що акреція відбувається у момент спостереження, можливість чого була показана для подвійних зір типу RS CVn [34], або мала місце досить нещодавно, і конвекція ще не встигла вирівняти аномалії кривої поширеності хімічних елементів в атмосфері зорі.

Потрібно обговорити можливість оцінки інтенсивності акреції міжзоряного газу, більшу частину якого складають атоми водню, по лініях цього хімічного елемента. Профілі ліній водню можуть змінитися у випадку великого потоку атомів з міжзоряного середовища. Як було показано на рис. 4, профіль лінії водню H γ у спектрі PMMR23 не показує емісійних компонентів, які спостерігаються у спектрах високошвидкісних надгігантів MMX. Емісія в крилах ліній водню повинна формуватися досить глибоко в атмосфері зорі.

Для червоних надгігантів швидкість теплових рухів атомів в атмосфері не перевищує 10...15 км/с навіть у її найглибших шарах. Різниця швидкостей зір і міжзоряного газу у частинах MMX, де спостерігаються підвищені променеві швидкості, трохи менша — від 5 до 9 км/с [47].

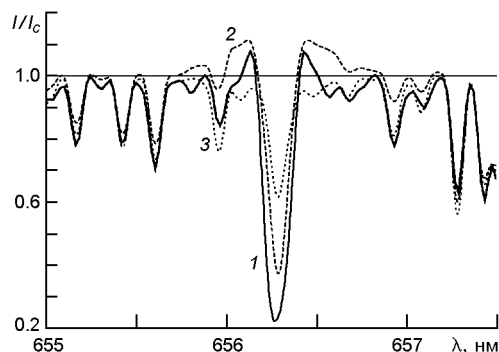
Атоми міжзоряного газу, падаючи на зорю, затримуються там і порушують структуру атмосфери. Однак слід зазначити, що довжина вільного пробігу атомів в атмосфері типового червоного надгіганта, не перевищує одного кілометра. Це означає, що атоми, які падають на атмосферу з навколишнього середовища, повинні затримуватися у верхніх шарах атмосфери, товщина якої вимірюється мільйонами кілометрів, тобто емісію у крилах ліній водню потрібно пояснювати іншим чином.

В табл. 3 наводяться ефективні температури (взяті з роботи [28]), спектральні класи та показники кольору у фотометричній системі *UBV* для зір, спектри яких показані на рис. 4. Показники кольору *B - V* для PMMR144 та *U - B* для RM 1-390 і RM 1-667 суттєво відрізняються

Таблиця 3. Фотометричні характеристики червоних надгігантів Магелланових Хмар

Об'єкт	$T_{\text{эф}}$, К	S_p	Літературне джерело	$B - V$	$U - B$	Літературне джерело
PMMR23	4200	K5-M0lab	[32]	1.76	1.37	[6, 8]
RM 1-390		M3I	[46]	1.52	0.23	[7]
RM 1-667	3750	K7I	[46]	1.50	0.30	[7]
PMMR27	4300	K11a-Iab	[15]	1.77		[46]
PMMR144	4100	K3-5I	[46]	1.12		[7, 50]
PMMR102	4300	G7.5Ia-Iab	[15]	1.72	1.50	[8]
PMMR48	4300	K5-M0I	[12]	1.79	1.69	[8]

Рис. 8. Фрагмент спектральних спостережень (1) високошвидкісного надгіганта PMMR144 Малої Магелланової Хмари навколо лінії водню H та синтетичні спектри, розраховані для моделі атмосфери з інверсією температури (2) та для моделі без інверсії (3)



від стандартних показників кольору холодних зір і можуть свідчити про наявність гарячого супутника. Нагадаємо, що емісія у крилах лінії H спостерігається лише у спектрі PMMR144 серед згаданих трьох зір.

Однією з можливих причин змін структури атмосфери може бути опромінення червоного надгіганта гарячим компонентом подвійної системи, яке розглядалося, наприклад, в роботі [57]. Спектральні спостереження червоних надгігантів Магелланових Хмар в синьому та УФ-діапазонах спектру повинні виявити питання наявності чи відсутності гарячих супутників і дозволити більш обґрунтовано обговорювати причину емісії в лініях водню. Поки що дані спостережень стосуються лише профіля лінії H.

Ми спробували розрахувати профіль лінії H для моделей атмосфер з інверсією температури, тобто з підвищенням температури у кількох шарах атмосфери на різних глибинах. Один з результатів таких розрахунків показано на рис. 8. Для параметрів моделі атмосфери PMMR144, згідно з нашим попереднім дослідженням [19], були прийняті значення ефективної температури $T_{\text{ef}} = 4100$ К, прискорення сили тяжіння в атмосфері $lgg = 0.7$, мікротурбулентної швидкості $v_{\text{mic}} = 4$ км/с. Модель атмосфери з цими параметрами була розрахована Р. Е. Лаком з використанням програми ATLAS12 [39].

Модель з інверсією краще описує профіль лінії водню, приблизно однакові результати можна отримати для моделей з підвищенням температури на 300...1000 К у кількох шарах на різних глибинах в атмосфері. Можливе підвищення температури у глибоких шарах атмосфери повинно впливати і на спектральні лінії інших хімічних елементів у спектрах зір, в яких спостерігається емісія водню.

Причина можливої інверсії температури не є очевидною, акреція або наявність гарячих супутників не дають повного пояснення цього ефекту, потрібні додаткові спостереження. Емісію у крилах лінії H знайдено тільки для чотирьох червоних надгігантів MMX.

Як уже було сказано, механізм, запропонований Грінстейном і Хавнсом, також лишається гіпотезою. Можливо, будуть запропоновані інші пояснення аномалій відносного вмісту хімічних елементів в атмосфері PMMR23 та в атмосферах декількох сотен зір, розглянутих в роботах [5, 21, 33, 34, 68]. Але можна сподіватися, що акреція газу з

міжзоряного середовища є важливою для багатьох типів зір, і розробка теорії цього ефекту дозволить поглибити наше розуміння зоряної еволюції.

ВИСНОВКИ

1. Знайдено вміст 35 хімічних елементів (від Li до Th) в атмосфері PMMR23 — червоного надгіганта у Малій Магеллановій Хмарі. Для Ti та U знайдено верхню межу вмісту.

2. Відносний вміст елементів з атомними номерами $Z \leq 56$ в атмосфері PMMR23 на 0.6—1.0 dex більший за відносний вміст елементів залізного піку.

3. Співвідношення вмістів більшості важких хімічних елементів ($Z \leq 56$) в атмосфері PMMR23 можна описати сонячною кривою поширеності ізотопів елементів r -, s -процесів.

4. Відносний вміст елементів з атомними номерами $39 \leq Z \leq 44$ значно менший, ніж можна очікувати при порівнянні з сонячною кривою поширеності ізотопів елементів r -, s -процесів.

5. Спостерігається кореляція відносного вмісту хімічних елементів в атмосфері PMMR23 з температурою конденсації та потенціалом другої іонізації цих елементів, що може бути обумовлено акрецією з міжзоряного середовища.

6. Акреція водню з міжзоряного середовища може бути причиною зменшеного вмісту елементів з атомними номерами $39 \leq Z \leq 44$.

7. Знайдено емісію в крилах лінії водню H γ у спектрах атмосфер червоних надгігантів Малої Магелланової Хмари PMMR27, PMMR144, PMMR102 та PMMR48, які перебувають в частинах MMX з підвищеними променевими швидкостями зір і міжзоряного газу.

Це дослідження було підтримано Корейським інститутом астрономії та наук про Всесвіт (проект 2015-1-320-18) у рамках програми досліджень і розвитку Міністерства науки та планування майбутнього. Двоє авторів (В. Ющенко та С. Андрієвський) були підтримані Швейцарським науковим фондом (проект SCOPES IZ73Z0-128180/1).

Автори вдячні В. Хілл за надані спектральні матеріали надгігантів Магелланових Хмар та Р. Е. Лаку за обчислення моделі атмосфери PMMR144.

1. Adams S. M., Kochanek C. S., Gerke J. R., Stanek K. Z., Dai X. The search for failed supernovae with the Large Binocular Telescope: confirmation of a disappearing star // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.—2017.—13 p. — eprint arXiv:1609.01283.
2. Allende P. C., Lambert D. L., Asplund M. The forbidden abundance of Oxygen in the Sun // Astrophys. J.—2001.—556.—P. L63—L66.
3. Bekki K. When was the Large Magellanic Cloud accreted on to the Galaxy? // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.—2011.—416, N 3.—P. 2359—2367.

4. *Biemont J., Palmeri P., Quinet P.* Database of Rare Earths at Mons University. — 2002.— <http://www.umh.ac.be/~astro/dream.html>
5. *Böhm-Vitense E.* The puzzle of the metallic line stars // *Publ. Astron. Soc. Pacif.*—2006.—**118**.—P. 419—435.
6. *Bonanos A. Z., Lennon D. J., Kohlinger F., et al.* Spitzer SAGE-SMC infrared photometry of massive stars in the Small Magellanic Cloud // *Astron. J.*—2010.—**140**.—P. 416—429.
7. *Bonanos A. Z., Massa D. L., Sewilo M., et al.* Spitzer SAGE infrared photometry of massive stars in the Large Magellanic Cloud // *Astron. J.*—2009.—**138**.—P. 1003—1021.
8. *Boyer M. L., Srinivasan S., Van Loon J. Th., et al.* Surveying the Agents of Galaxy Evolution in the tidally stripped, low metallicity Small Magellanic Cloud (SAGE-SMC). II. Cool evolved stars // *Astron. J.*—2011.—**142**.—id. 103.—23 p.
9. *Castelli F., Kurucz R. L.* New Grids of ATLAS9 Model Atmospheres // *Modelling of Stellar Atmospheres: Proceedings of the 210th Symposium of the IAU / Eds N. Piskunov, W. W. Weiss, D. F. Gray.* — Uppsala, Sweden, 2003.—Poster A20.
10. *Delbouille L., Roland G., Neven L.* Photometric atlas of the solar spectrum from 3000 to 10000. — Liège: Institute de Astrophisique de Universitete de Liège, 1973.—Magnetic tape copy.
11. *Den Hartog E. A., Lawler J. E., Sneden C., Cowan J. J.* Improved laboratory transition probabilities for Nd II and application to the Neodymium abundances of the Sun and three metal-poor stars // *Astrophys. J. Suppl. Ser.*—2003.—**148**, N 2.—P. 543—566.
12. *Elias J. H., Frogel J. A., Humphreys R. A.* M supergiants in the Milky Way and the Magellanic Clouds: colors, spectral types, and luminosities // *Astrophys. J. Suppl. Ser.*—1985.—**57**.—P. 91—131.
13. *Fuhr J. R., Wiese W. L.* A critical compilation of atomic transition probabilities for neutral and singly ionized iron // *J. Phys. Chem. Ref. Data.*—2006.—**35**, N 4.—P. 1669—1809.
14. *Gerke J. R., Kochanek C. S., Stanek K. Z.* The search for failed supernovae with the Large Binocular Telescope: first candidates // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2015.—**450**, N 3.—P. 3289—3305.
15. *Gonzalez-Fernandez C., Dorda R., Negueruela I., Marco A.* A new survey of cool supergiants in the Magellanic Clouds // *Astron. and Astrophys.*—2015.—**578**.—id. A3.—13 p.
16. *Gopka V. F., Shavrina A. V., Yushchenko V. A., et al.* On the thorium absorption lines in the visible spectra of supergiant stars in the Magellanic Clouds // *Bull. Crimean Astrophys. Observatory.*—2013.—**109**, N 1.—P. 41—47.
17. *Gopka V. F., Vasileva S. V., Andrievsky S. M., Yushchenko A. V.* Thorium lines in the spectra of several SMC supergiant stars // *Odessa Astron. Publ.*—2007.—**20**.—P. 58—61.
18. *Gopka V. F., Yushchenko A. V., Andrievsky S. M., et al.* The abundances of chemical elements in the atmospheres of K-supergiants in the Small Magellanic Cloud and Arcturus // *Proc. IAU Symp. N 228.*—2005.—P. 535—536.
19. *Gopka V., Yushchenko A., Kovtyukh V., et al.* The abundances of heavy elements in red supergiants of Magellanic Clouds // *Odessa Astron. Publ.*—2013.—**26**.—P. 54—58.
20. *Gopka V. F., Yushchenko A. V., Mishenina T. V., et al.* Atmospheric chemical composition of the Halo Star HD 221170 from a synthetic-spectrum analysis // *Astron. Reports.*—2004.—**48**, N 7.—P. 577—587.
21. *Greenstein J. L.* Analysis of the metallic-line stars. II // *Astrophys. J.*—1949.—**109**.—P. 121—138.

22. *Grevesse N., Asplund M., Sauval A. J., Scott P.* The chemical composition of the Sun // *Astrophys. and Space Sci.*—2010.—**328**, N 1-2.—P. 179—183.
23. *Grevesse N., Scott P., Asplund M., Sauval A. J.* The elemental composition of the Sun. III. The heavy elements Cu to Th // *Astron. and Astrophys.*—2015.—573.—id. A27.—23 p.
24. *Havnes O.* Abundances and acceleration mechanisms of cosmic rays // *Nature.*—1971.—**229**, N 5286.—P. 548—549.
25. *Havnes O.* Magnetic stars as generators of cosmic rays // *Astron. and Astrophys.*—1971.—**13**.—P. 52—57.
26. *Havnes O., Conti P. S.* Magnetic accretion processes in peculiar A stars // *Astron. and Astrophys.*—1971.—**14**.—P. 1—11.
27. *Heger A., Fryer C. L., Woosley S. E., Langer N., Hartmann D. H.* How massive single stars end their life // *Astrophys. J.*—2003.—**591**, N 1.—P. 288—300.
28. *Hill V.* Chemical composition of six K supergiants in the Small Magellanic Cloud // *Astron. and Astrophys.*—1997.—**324**.—P. 435—448.
30. *Hill V., Barbay B., Spite M.* Carbon, nitrogen, oxygen and lithium abundances of six cool supergiants in the SMC // *Astron. and Astrophys.*—1997.—**323**.—P. 461—468.
29. *Hildithich R. W., Howarth I. D., Harries T. J.* Forty eclipsing binaries in the Small Magellanic Cloud // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2006.—**357**, N 1.—P. 304—324.
31. *Hirata R., Horaguchi T.* Atomic spectral line list // SIMBAD Catalog VI/69.—1995.—<ftp://cdsarc.u-strasbg.fr/pub/cats/VI/69>.
32. *Humphreys R. M.* M supergiants and the low metal abundances in the Small Magellanic Cloud // *Astrophys. J.*—1979.—**231**.—P. 384—387.
33. *Kang Y.-Woon, Yushchenko A., Hong K., Kim S., Yushchenko V.* Chemical composition of the components of eclipsing binary star ZZ Bootis // *Astron. J.*—2012.—**144**, N 2.—id. 35.—11 p.
34. *Kang Y.-Woon, Yushchenko A. V., Hong K., Guinan E. F., Gopka V. F.* Signs of accretion in the abundance patterns of the components of the RS CVn-type eclipsing binary star LX Persei // *Astron. J.*—2013.—**145**, N 6.—id. 167.—15 p.
35. *Kelleher D. E., Podobedova L. I.* Improved critical compilations of selected atomic transition probabilities for neutral and singly ionized carbon and nitrogen // *J. Phys. Chem. Ref. Data.*—2008.—**37**, N 1.—P. 267—706.
36. *Kelleher D. E., Podobedova L. I.* Atomic transition probabilities of aluminum. A critical compilation // *J. Phys. Chem. Ref. Data.*—2008.—**37**, N 2.—P. 709—911.
37. *Kochanek C. S., Beacom J. F., Kistler M. D., et al.* A survey about nothing: monitoring a million supergiants for failed supernovae // *Astrophys. J.*—2008.—**684**, N 2.—P. 1336—1342.
38. *Kurucz R. L.* Atomic and molecular data for opacity calculations // *Rev. mex. astron. y astrofis.*—1992.—**23**.—P. 45—48.
39. *Kurucz R. L.* Atomic data for opacity calculations. — Cambridge, Mass., Smithsonian Astrophysical Observatory, 1993.—CD-ROM N 1—23.
40. *Kurucz R. L.* An atomic and molecular data bank for stellar spectroscopy // *Astron. Soc. Pacif. Conf. Ser.*—1995.—N 81.—P. 583—588.
41. *Kurucz R. L., Peytremann E.* A table of semiempirical gf values. 1. Wavelengths: 5.2682 nm to 272.3380 nm // *SAO Special Report.*—1975.—N 362, part 1.—P. 1—1223.
42. *Levesque E. M.* Red supergiants in Local Group // *EAS Publs Ser.*—2013.—**60**.—P. 269—277.—(Betelgeuse Workshop 2012. The Physics of Red Supergiants:

- Recent Advances and Open Questions / Eds P. Kervella, T. Le Bertre, G. Perrin).
43. *Lodders K.* Solar system abundances and condensation temperatures of the elements // *Astrophys. J.*—2003.—**591**, N 2.—P. 1220—1247.
 44. *Martin N., Maurice E., Lequeux J.* The structure of the Small Magellanic Cloud // *Astron. and Astrophys.*—1989.—**215**, N 2.—P. 219—242.
 45. *Mashonkina L., Ryabchikova T., Ryabtsev A., Kildiyarova R.* Non-LTE line formation for Pr II and Pr III in A and Ap stars // *Astron. and Astrophys.*—2009.—**495**, N 1.—P. 297—311.
 46. *Massey P., Olsen K. A. G.* The evolution of massive stars. I. Red supergiants in the Magellanic Clouds // *Astron. J.*—2003.—**126**.—P. 2867—2886.
 47. *McGee R. X., Newton L. M.* H I in the Small Magellanic Cloud re-examined // *Proc. Astron. Soc. Austral.*—1981.—**4**, N 2.—P. 189—195.
 48. *Meynet G., Chomienné V., Ekström S., et al.* Impact of mass-loss on the evolution and pre-supernova properties of red supergiants // *Astron. and Astrophys.*—2015.—**575**.—id. A60.—19 p.
 49. *Morton D. C.* Atomic data for resonance absorption lines. II. Wavelengths longward of the Lyman limit for heavy elements // *Astrophys. J. Suppl. Ser.*—2000.—**130**, N 2.—P. 403—436.
 50. *Munari U., Henden A., Frigo A., et al.* APASS Landolt-Sloan BVgri photometry of RAVE stars. I. Data, effective temperatures, and reddenings // *Astron. J.*—2014.—**148**.—id. 81.—15 p.
 51. *Murphy S. J., Paunzen E.* Gaia's view on the lambda Boo star puzzle // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2017.—**466**.—P. 546—555.
 52. *Nilsson H., Ivarsson S., Johansson S., Lundberg H.* Experimental oscillator strengths in U II of cosmological interest // *Astron. and Astrophys.*—2002.—**381**.—P. 1090—1093.
 53. *Nilsson H., Zang Z. G., Lundberg H., Johansson S., Nordström B.* Experimental oscillator strengths in Th II // *Astron. and Astrophys.*—2002.—**382**.—P. 368—377.
 54. *Piskunov N. E., Kupka F., Ryabchikova T. A., Weiss W. W., Jeffery C. S.* VALD: The Vienna Atomic Line Data base // *Astron. and Astrophys.*—1995.—**112**.—P. 525—535.
 55. *Prevot L., Martin N., Rebeirot E., Maurice E., Rousseau J.* A catalogue of late-type supergiant stars in the Small Magellanic Cloud // *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.*—1983.—**53**.—P. 255—269.
 56. *Proffitt C. R., Michaud G.* Abundance anomalies in A and B stars and the accretion of nuclear-processed material from Supernovae and evolved giants // *Astrophys. J.*—1989.—**345**.—P. 998—1007.
 57. *Proga D., Kenyon S. J., Raymond J. C.* Illumination in symbiotic binary stars: non-LTE photoionization models. II. Wind case // *Astrophys. J.*—1998.—**501**.—P. 339—356.
 58. *Ren J., Christlieb N., Zhao G.* The Hamburg/ESO R-process Enhanced Star survey (HERES). VII. Thorium abundances in metal-poor stars // *Astron. and Astrophys.*—2012.—**537**.—article id. A118.—12 p.
 59. *Russell S. C.* Heavy element abundances in the magellanic clouds // *Proc. Astron. Soc. Austral.*—1991.—**9**, N 1.—P. 82—84.
 60. *Simmerer J., Sneden C., Cowan J. J., Collier J., Woolf V. M., Lawler J. E.* The rise of the s-process in the galaxy // *Astrophys. J.*—2004.—**617**, N 2.—P. 1091—1114.
 61. *Siqueira Mello C., Hill V., Barbay B., et al.* High-resolution abundance analysis of very metal-poor r-I stars // *Astron. and Astrophys.*—2014.—**565**.—id. A93.—23 p.
 62. *Smartt D. J.* Observational constraints on the progenitors of core-collapse supernovae:

- the case for missing high-mass stars // *Publ. Astron. Soc. Austral.*— 2015.—**32**.—id. e016.—22 p.
63. *Szewczyk O., Pietrzynski G., Gieren W., et al.* The Araucaria project: the distance to the Small Magellanic Cloud from near-infrared photometry of RR Lyrae variables // *Astron. J.*—2009.—**138**, N 6.—P. 1661—1666.
64. *Venn K. A., Lambert D. L.* The chemical composition of three Lambda Bootis stars // *Astrophys. J.* —1990.—**363**.—P. 234—244.
65. *Venn K. A., Lambert D. L.* Could the ultra-metal-poor stars be chemically peculiar and not related to the first stars? // *Astrophys. J.*—2008.—**677**.—P. 572—580.
66. *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 / Ed. by J. Dusek.* — Brno, 1998.—P. 201—203.
67. *Yushchenko A., Gopka V., Goriely S., et al.* Thorium-rich halo star HD 221170: Further evidence against the universality of the *r*-process // *Astron. and Astrophys.*—2005.—**430**.—P. 255—262.
68. *Yushchenko A. V., Gopka V. F., Kang Y.-Woon, et al.* The chemical composition of Puppis and the signs of accretion in the atmospheres of B-F-type stars // *Astron. J.* — 2015.—**149**, N 2.—id. 59.—22 p.
69. *Yushchenko A. V., Gopka V. F., Khokhlova V. L., Musaev F. A., Bikmaev I. F.* Atmospheric chemical composition of the «twin» components of equal mass in the CP SB2 system 66 Eri // *Astron. Lett.*—1999.—**25**, N 7.—P. 453—466.

Стаття надійшла до редакції 08.11.16