

УДК 524.333.3; 524.722

Ф. А. Чехонадских

Научно-исследовательский институт «Одесская астрономическая обсерватория»
Одесского национального университета имени И. И. Мечникова
парк им. Т. Г. Шевченко, Одесса, 65014
e-mail: chehonadskih@gmail.com

Химический состав атмосфер и абсолютные звездные величины F- и G-сверхгигантов Магеллановых Облаков

Методом моделей атмосфер исследован 31 желтый сверхгигант из Большого и Малого Магеллановых Облаков. Использовались спектры высокого разрешения. Определены содержания 20 химических элементов и показано, что α -элементы находятся в незначительном избытке, а элементы нейтронного захвата имеют избыток до 0.60 dex. Апробирован новый метод определения абсолютных звездных величин сверхгигантов поздних спектральных классов, основанного на использовании спектроскопического критерия (отношения глубин спектральных линий железа). По этой методике рассчитаны абсолютные звездные величины для девяти сверхгигантов Большого Магелланового Облака. Для Большого Магелланового Облака получена оценка модуля расстояния: $m - M = 18.4 \pm 0.3^m$.

ХІМІЧНИЙ СКЛАД АТМОСФЕР ТА АБСОЛЮТНІ ЗОРЯНІ ВЕЛИЧИН F- ТА G-НАДГІГАНТІВ МАГЕЛЛАНОВИХ ХМАР, Чехонадських Ф. А. — Методом моделей атмосфер досліджено 31 жовтий надгігант з Великої та Малої Магелланових Хмар. Використано спектри високого розділення. Знайдено вміст 20 хімічних елементів і показано, що α -елементи перебувають у незначному надлишку, а елементи нейтронного захоплення мають надлишок до 0.60 dex. Апробовано новий метод визначення абсолютних зоряних величин надгігантів пізніх спектральних класів, в основі якого лежить використання спектроскопічного критерію (відношення глибин спектральних ліній заліза). За цією методикою розраховані абсолютні зоряні величини для дев'яти надгігантів Великої Магелланової Хмари. Для Великої Магелланової Хмари отримано оцінку модуля відстані: $m - M = 18.4 \pm 0.3^m$.

ABUNDANCES AND ABSOLUTE STELLAR MAGNITUDES FOR F AND G SUPERGIANTS OF THE MAGELLANIC CLOUDS, by Chekhonadskikh F. A. — With the use of high-resolution and high-quality spectra, 31 yellow supergiants of the Large (LMC) and Small (SMC) Magellanic Clouds are investigated through the method of atmosphere modeling. The abundance values for 20 chemical elements are determined. It is shown that alpha-elements are in a slight excess and neutron-capture elements have an excess up to 0.60 dex. The approbation of a new method for the determination of absolute stellar magnitudes of supergiants of late spectral types is performed. The method is based on the employment of the spectroscopic criteria, namely, the depth-line ratios for iron. Absolute stellar magnitudes of nine LMC supergiants are calculated using this method. The value of the LMC distance modulus is estimated: $m - M = 18.4 \pm 0.3^m$.

ВВЕДЕНИЕ

Большое и Малое Магеллановы Облака (БМО и ММО) являются наибольшими из близлежащих галактик, которые образуют подгруппу галактик Млечного Пути. Длительное время было технически сложно получать спектры высокого разрешения для детального изучения атмосфер звезд, входящих в БМО и ММО. Только с вводом в эксплуатацию мощных современных инструментов открылась возможность детального исследования особенностей химической эволюции этих объектов.

Уже давно установленным фактом является общий дефицит металлов в БМО, и особенно в ММО. Этот дефицит характерен не только для старых холодных звезд, но и для молодых горячих, что говорит о медленном темпе обогащения межзвездной среды металлами. Эволюция Магеллановых Облаков (МО) проходит по сценарию, значительно отличающемуся от сценария для нашей Галактики, и немалую роль тут играет небольшая масса этих галактик. Вследствие того что БМО и ММО менее массивны, темп звездообразования у них более медленный, чем в Галактике. Также важную роль в химической эволюции неправильных галактик может играть галактический ветер, инициированный вспышками Сверхновых [22]. Но многие вопросы продолжают оставаться открытыми, и для их решения необходимо накопление эмпирических данных, что делает задачу определения химического состава для большего числа звезд актуальной и сегодня.

Судить о химическом составе звезд в Магеллановых Облаках можно по ряду работ. Так, изучение сверхгигантов спектрального класса *A* в ММО [26] показало некоторый избыток α -элементов (Mg, Si, Ca) и тяжелых элементов *s*-процесса (Zr, Ba) по сравнению с железом. Там же определена металличность ММО, равная -0.7 dex. Эти результаты согласуются с данными, полученными при исследовании *B*-сверхгигантов и поздних сверхгигантов спектральных классов *F–K*.

В исследовании [9] приведены значения металличности БМО $[Fe/H] = -0.4$ dex и ММО $[Fe/H] = -0.7$ dex, определенные по спектрам В-сверхгигантов. Отмечено, что звезды двух скоплений в МО не имели заметных отличий в химическом составе по сравнению со звездами поля.

Подробное и масштабное исследование сверхгигантов спектральных классов *F* и *K* представлено в работе [19]. На основе большого количества элементов получены металличности -0.3 dex (БМО) и -0.68 dex (ММО), а также отмечены избытки *r*- и *s*-элементов. Эти выводы были подтверждены последующими исследованиями [2, 4].

Необходимо отметить, что значения металличности, полученные из фотометрических исследований, хорошо согласуются со спектроскопическими. Так, в работе [16] получены оценки -0.3 dex и -0.65 dex для БМО и ММО соответственно.

Далее будут представлены результаты анализа химического состава атмосфер исследованных сверхгигантов: 21 классической цефеиды БМО и 10 цефеид ММО. Высокое разрешение спектров позволяет надежно измерять глубины и эквивалентные ширины спектральных линий. Благодаря этому появляется возможность независимой апробации новой методики, предложенной в работе [11] для определения абсолютных звездных величин *F*- и *G*-сверхгигантов по спектроскопическим критериям.

СПЕКТРАЛЬНЫЙ МАТЕРИАЛ И ЕГО ОБРАБОТКА

Спектры сверхгигантов были получены на Европейской южной обсерватории (ESO, Чили) на спектрографе UVES [5], установленном на 8-м телескопе VLT Unit2 (Киеуен). Разрешение спектров близко к 30000, участок длин волн $\lambda = 480...680$ нм, отношение сигнал/шум составляет 50—70. Редуцированные спектры, прошедшие первичную обработку, были взяты из общедоступного электронного архива ESO [http://archive.eso.org/eso/eso_archive_adp.html]. Эти спектры ранее использовались только для оценки металличности при исследовании чувствительности зависимости период — светимость цефеид к этому параметру [23]. Другие элементы исследованы впервые.

Дальнейшая обработка спектров (проведение континуума, отождествление спектральных линий, измерение глубин и эквивалентных ширин линий) проводилась при использовании стандартных процедур с помощью программы DECH20 [1].

ПАРАМЕТРЫ АТМОСФЕР

В значительной степени надежность определения химического состава зависит от точности определения параметров атмосферы, особенно эффективной температуры $T_{\text{эф}}$.

Значения эффективных температур определялись с использованием метода [10], который основан на использовании отношений глубин

пар спектральных линий, отобранных по критерию наибольшей чувствительности к температуре. Благодаря большому числу калибровок (более 130) этот метод обеспечивает внутреннюю точность определения $T_{\text{эф}}$ порядка 10—30 К (ошибка среднего). Параллельно $T_{\text{эф}}$ оценивалась из условия независимости содержания нейтрального железа $\lg(\text{Fe}/\text{H})$ от потенциала возбуждения нижнего уровня. И хотя этот метод менее точен (влияние неЛТР-эффектов на линии нейтрального железа достаточно существенно [3, 17, 18], и ошибка составляет около 200 К), однако он позволил грубо оценить $T_{\text{эф}}$. Различие значений $T_{\text{эф}}$, полученных по отношению глубин спектральных линий, составило всего 50—100 К, что позволило окончательно остановиться на значениях $T_{\text{эф}}$, полученных по спектроскопическому критерию.

Величина микротурбулентной скорости V_t определялась из условия независимости содержания ионизированного железа Fe II, определяемого по набору линий, от их эквивалентных ширин [12]. Такой подход был вызван тем, что в атмосферах сверхгигантов условия сильно отклоняются от локального термодинамического равновесия (ЛТР), а линии Fe I, как уже отмечалось выше, сильно подвержены неЛТР-эффектам. В то же время линии Fe II практически свободны от этого недостатка [24]. При определении микротурбулентной скорости V_t по линиям Fe II содержание Fe I из-за влияния неЛТР-эффектов становится сильно зависимым от эквивалентной ширины W . Чем сильнее линия, тем в среднем больший дефицит она показывает по отношению к слабым линиям. Поэтому содержание Fe I определялось путем линейной интерполяции на линию с $W = 0$ [12]. Ускорение свободного падения $\lg g$ находилось из условия ионизационного равновесия для атомов Fe I и Fe II. Такой модифицированный подход позволяет в значительной степени нивелировать неЛТР-эффекты для железа и дает возможность более точно определять параметры атмосфер и химический состав.

В табл. 1 представлены результаты определения параметров атмосфер. Анализ показывает, что параметры, приведенные в данной работе, хорошо согласуются с данными [23]: различие температур 100—200 К значение $\lg g$ в среднем выше на 0.5—1.0 dex, V_t — на 1—2 км/с. Такое различие объясняется тем, что в работе [23] применена стандартная процедура определения $\lg g$ и V_t и использованы устаревшие калибровки при определении $T_{\text{эф}}$.

ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ

Содержание химических элементов определялось методом моделей атмосфер при помощи программы WIDTH9 [14]. Модели атмосфер интерполировались из сетки моделей Куруца [13]. Также были использованы солнечные силы осцилляторов [12], определенные на основе атласа солнечного спектра Куруца и др. [15] и солнечный хими-

Таблица 1. Фундаментальные параметры атмосфер

Звезда	$T_{\text{эф}}$, К	lgg	V_i	[Fe/H]	Звезда	$T_{\text{эф}}$, К	lgg	V_i	[Fe/H]
Большое Магеллановое Облако									
HV 877	4831	1.0	6.0	-0.25	HV 2405	5985	1.8	5.0	-0.24
HV 879	5809	1.2	5.3	-0.11	HV 2580	5461	1.2	3.5	-0.06
HV 971	5943	1.9	4.0	-0.36	HV 2733	5473	1.6	5.0	-0.25
HV 997	5782	1.5	6.0	-0.28	HV 2793	5505	1.0	3.5	-0.07
HV 1013	4662	0.3	5.3	-0.40	HV 2827	4892	0.3	4.7	-0.20
HV 1023	5909	1.5	4.5	-0.18	HV 2836	5471	1.1	4.0	-0.13
HV 2260	5898	1.8	4.0	-0.06	HV 2864	5799	1.6	3.7	-0.17
HV 2294	5232	0.9	5.0	-0.16	HV 5497	5206	0.6	6.1	-0.29
HV 2337	5489	1.5	4.5	-0.12	HV 12452	5548	1.5	4.0	-0.16
HV 2352	6300	1.8	5.5	-0.26	HV 12700	5451	1.4	4.1	-0.22
HV 2369	4794	0.2	4.0	-0.11					
Малое Магеллановое Облако									
HV 817	5940	1.4	4.7	-0.61	HV 847	4817	0.4	4.5	-0.66
HV 824	5333	1.1	4.5	-0.54	HV 1954	5974	1.6	5.2	-0.61
HV 829	5350	1.0	7.0	-0.62	HV 2064	5832	1.5	5.3	-0.39
HV 834	6016	1.6	6.0	-0.38	HV 2195	6211	1.6	6.8	-0.47
HV 837	5355	1.0	4.6	-0.55	HV 11211	5067	0.8	4.0	-0.58

ческий состав по данным [7]. В табл. 2—5 представлены средние относительные (относительно Солнца) содержания химических элементов в атмосферах исследованных сверхгигантов БМО и ММО. Для некоторых элементов (Si, Ti, V, Cr, Fe) приведены значения, усредненные по линиям основного и ионизированного состояний, учитывалось число линий. Для всех исследованных звезд подробный анализ химического состава проведен впервые.

Из табл. 2—5 видно, что все звезды имеют дефицит железа по сравнению с солнечным содержанием. Железо по сравнению с другими элементами представлено большим числом линий поглощения, поэтому можно считать, что его содержание определено достаточно надежно. Значение [Fe/H] для сверхгигантов БМО изменяется в пределах от -0.06 до -0.41 dex при ошибке определения меньше 0.2 dex, а сверхгиганты ММО показывают еще больший дефицит железа — от -0.38 до -0.66 dex. Средняя металличность, полученная по всем исследованным звездам, составляет -0.20 dex для БМО и -0.54 dex для ММО и незначительно отличается от традиционных значений.

Сверхгиганты поздних спектральных классов МО обладают рядом особенностей химического состава. Одним из них является содержание Na, которое показывает избыток у сверхгигантов Галактики [3]. Однако ни для звезд БМО, ни для звезд ММО заметного избытка Na найдено не было. Данный факт пока не получил должного объяснения.

Также большой интерес представляют элементы α -процесса, в данном случае это элементы Mg, Si, S, Ca. В нашей Галактике наблю-

Таблица 2. Химический состав сверхгигантов БМО (элементы от С до Тi)

Звезда	[C/H]	[O/H]	[Na/H]	[Mg/H]	[Al/H]	[Si/H]	[S/H]	[Ca/H]	[Sc/H]	[Ti/H]
HV 877		-0.07	-0.38		-0.21	-0.33	-0.37	0.16	-0.43	-0.15
HV 879	-0.43	-0.04	-0.07	-0.31	-0.16	0.06	-0.01	-0.23	0.27	-0.08
HV 971	-0.21	-0.11	-0.39	-0.38		-0.32	-0.03	-0.38	-0.03	-0.47
HV 997	-0.33	-0.33	-0.27	-0.40		-0.22	-0.18	-0.34	-0.41	-0.36
HV 1013					-0.5	-0.28	-0.32	-0.68	-0.53	-0.30
HV 1023	-0.50		-0.36	-0.25	0.00	-0.11	-0.03	-0.10	-0.31	-0.26
HV 2260	-0.73	0.21	-0.16	-0.13	-0.08	0.00	0.08	0.03	-0.09	0.05
HV 2294	-0.09	0.05	-0.36	-0.28	-0.07	-0.18	-0.01	-0.26	-0.39	-0.17
HV 2337	0.08	-0.04	-0.22	-0.2	-0.52	-0.11	0.08	-0.22	-0.06	-0.18
HV 2352	-0.22		-0.30	-0.25		-0.17	-0.15	-0.24	-0.32	-0.18
HV 2369	-0.59		-0.32		-0.36	-0.13	-0.22	0.02	-0.41	-0.11
HV 2405	-0.45			-0.32		-0.05	0.36	-0.14	-0.18	-0.23
HV 2580	-0.26	-0.09	-0.19	-0.11	0.04	-0.09	0.08	-0.03	-0.13	-0.04
HV 2733	-0.45	-0.65	-0.42	-0.42	-0.19	-0.24	0.12	-0.37	-0.10	-0.14
HV 2793	-0.30	-0.67	-0.29	0.00	0.00	0.02	0.07	-0.04	-0.35	0.06
HV 2827	-0.20	-0.22	-0.29		-0.17	-0.13	0.00	-0.24	-0.47	-0.21
HV 2836	-0.32	0.11		-0.35	0.09	-0.09	0.02	-0.14	-0.31	-0.08
HV 2864	-0.53	-0.34	-0.31	-0.09	-0.11	-0.12	0.00	-0.13	-0.09	-0.04
HV 5497	-0.61	-0.26	-0.31		-0.09	-0.21	-0.12	-0.31	-0.34	-0.17
HV 12452	-0.35	-0.06	-0.27	-0.11	-0.02	-0.02	0.08	-0.21	-0.31	-0.07
HV 12700	-0.29	0.05	-0.37	-0.33	-0.32	-0.19	-0.10	-0.23	-0.32	-0.13

Таблица 3. Химический состав сверхгигантов БМО (элементы от V до Eu)

Звезда	[V/H]	[Cr/H]	[Fe/H]	[Co/H]	[Ni/H]	[Y/H]	[Nd/H]	[Sm/H]	[Eu/H]
HV 877	-0.40	-0.29	-0.25	-0.58	-0.54	-0.11	0.06		0.06
HV 879	-0.24	-0.10	-0.12	0.12	-0.2	0.01	0.18	0.21	0.19
HV 971	-0.17	-0.31	-0.36	0.25	-0.51	-0.32	0.06	0.04	-0.06
HV 997	-0.22	-0.24	-0.28	0.21	-0.43	-0.16	0.09	0.13	0.01
HV 1013	-0.64	-0.67	-0.41	-1.00	-0.67	-0.61	-0.20	-1.01	-0.17
HV 1023	0.52	-0.09	-0.18	-0.38	-0.32	-0.01	0.14	0.17	0.08
HV 2260	-0.22	0.07	-0.06	0.30	-0.19	0.00	0.30	0.36	0.24
HV 2294	-0.12	-0.1	-0.16	-0.29	-0.35	-0.11	0.07		0.16
HV 2337	0.24	-0.24	-0.12	-0.27	-0.4	-0.21	0.09	-0.21	0.31
HV 2352	0.04	-0.24	-0.26	-0.20	-0.38	-0.21	0.03	0.01	0.28
HV 2369	-0.73	-0.11	-0.11	-0.65	-0.46	-0.18	0.02		0.00
HV 2405	0.07	-0.51	-0.24	-0.12	-0.29	-0.18	0.27		0.46
HV 2580	-0.08	0.04	-0.06	0.16	-0.26	-0.03	0.21	0.51	0.29
HV 2733	-0.03	-0.20	-0.25	-0.34	-0.47	-0.19	0.15	0.00	0.14
HV 2793	-0.10	-0.13	-0.07	-0.09	-0.21	0.01	0.22	0.52	0.21
HV 2827	-0.34	-0.25	-0.2	-0.43	-0.49	-0.21	0.01		0.11
HV 2836	-0.11	-0.15	-0.13	-0.47	-0.38	-0.11	0.12	0.26	0.13
HV 2864	0.15	-0.14	-0.17	-0.36	-0.28	-0.13	0.18	0.25	0.29
HV 5497	-0.51	-0.17	-0.29	-0.49	-0.42	-0.19	0.03		
HV 12452	-0.10	-0.17	-0.16	-0.15	-0.31	-0.14	0.09	0.12	0.13
HV 12700	-0.04	-0.13	-0.22	-0.34	-0.39	-0.17	0.15	0.26	0.19

Таблица 4. Химический состав сверхгигантов ММО (элементы от С до Тi)

Звезда	[C/H]	[O/H]	[Na/H]	[Mg/H]	[Al/H]	[Si/H]	[S/H]	[Ca/H]	[Sc/H]	[Ti/H]
HV 817	-0.76	—	-0.75	-0.67	—	-0.56	-0.56	-0.58	-0.75	-0.56
HV 824	-0.66	-0.25	-0.76	-0.57	—	-0.45	-0.24	-0.58	-0.65	-0.48
HV 829	—	-0.21	-0.74	-0.55	—	-0.49	-0.42	-0.55	-0.56	-0.45
HV 834	-1.01	-0.38	—	-0.43	—	-0.28	-0.38	-0.41	-0.39	-0.19
HV 837	-0.55	—	-0.37	-0.65	-0.50	-0.38	-0.36	-0.6	-0.6	-0.58
HV 847	-0.70	-0.69	—	-0.81	-0.75	-0.46	—	-0.83	-0.74	-0.57
HV 1954	—	—	-0.68	-0.68	—	-0.41	-0.59	-0.56	-0.75	-0.61
HV 2064	—	—	—	-0.50	—	-0.26	-0.17	-0.39	-0.32	-0.31
HV 2195	—	—	-0.60	-0.50	—	-0.40	-0.45	-0.53	-0.55	-0.47
HV 11211	—	—	—	-0.76	-0.51	-0.52	-0.36	-0.65	-0.81	-0.60

Таблица 5. Химический состав сверхгигантов ММО (элементы от V до Eu)

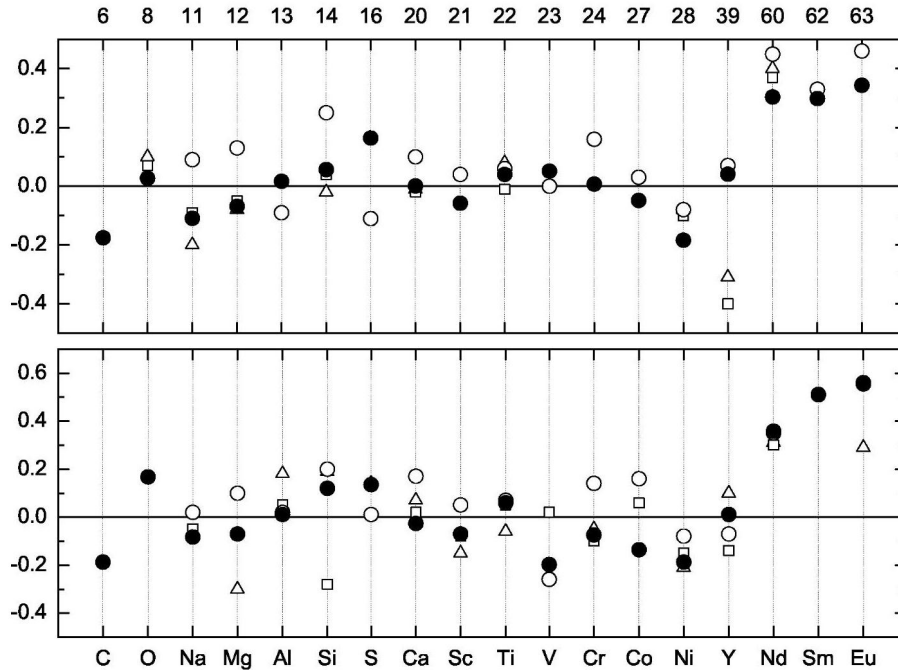
Звезда	[V/H]	[Cr/H]	[Fe/H]	[Co/H]	[Ni/H]	[Y/H]	[La/H]	[Nd/H]	[Sm/H]	[Eu/H]
HV 817	—	-0.76	-0.61	—	-0.72	-0.62	0.13	-0.26	-0.37	-0.17
HV 824	-0.70	-0.58	-0.54	-0.61	-0.78	-0.51	-0.12	-0.22	0.17	0.18
HV 829	—	-0.69	-0.62	-0.66	-0.68	-0.48	-0.03	-0.21	—	-0.04
HV 834	—	-0.39	-0.38	-0.4	-0.56	-0.18	0.23	0.11	0.26	0.23
HV 837	-0.76	-0.67	-0.55	-0.76	-0.85	-0.59	0.00	-0.23	-0.07	0.14
HV 847	-0.82	-0.66	-0.66	-0.91	-0.95	-0.77	-0.35	-0.5	-0.17	-0.32
HV 1954	—	-0.66	-0.61	-0.61	-0.74	-0.77	—	-0.27	-0.23	-0.19
HV 2064	-0.56	-0.44	-0.39	-0.53	-0.49	-0.30	0.13	0.04	0.08	0.23
HV 2195	-0.69	-0.67	-0.47	—	-0.67	-0.40	0.35	0.00	0.19	0.25
HV 11211	-0.85	-0.63	-0.58	-0.94	-0.85	-0.68	-0.29	-0.29	-0.05	-0.17

дается избыток этих элементов в атмосферах звезд с дефицитом металлов. Однако и в БМО, и в ММО небольшой избыток показали лишь Si и S — до 0.2 dex.

Элементы «железного пика», которые представлены элементами Sc, Ti, V, Cr, Co, не показывают заметных аномалий. Возможный дефицит показывают Ni (-0.18 dex для БМО и -0.19 dex для ММО) и V для ММО со значением -0.18 dex. Вероятно, это вызвано неЛТР-эффектами, которые в достаточной мере компенсируются только для нейтрального железа, но эти эффекты не могут быть выявлены для остальных элементов из-за недостаточного количества линий.

Отдельный интерес представляют более тяжелые элементы, образующиеся в результате нейтронного захвата, представленные здесь s-элементами Y, La, Nd, Sm и r-элементом Eu. Эти элементы показывают существенный избыток по отношению к железу (до 0.6 dex) в хорошем согласии с данными из других источников.

На рисунке приведены усредненные по всем объектам значения содержаний элементов для БМО и ММО. Можно отметить общее хорошее согласие данных, а небольшие отклонения легко объяснить раз-



Средние относительные содержания элементов: *верхний фрагмент* — для БМО (точки — наши данные, кружки — данные [19], квадратики и треугольники — данные [21] для сверхгигантов скопления NGC 1866 и для сверхгигантов поля соответственно); *нижний фрагмент* — для ММО (точки — наши данные, кружки — данные [19], квадратики — данные [2], треугольники — данные [4])

личием методологических подходов, так как в разных работах использовались разные методы определения параметров атмосфер, разные силы осцилляторов, и усреднение проводилось по различному количеству исследованных звезд.

АБСОЛЮТНЫЕ ЗВЕЗДНЫЕ ВЕЛИЧИНЫ ДЛЯ СВЕРХГИГАНТОВ БОЛЬШОГО МАГЕЛЛАНОВОГО ОБЛАКА

В работе [11] была предложена методика оценки абсолютных звездных величин (M_V) сверхгигантов поздних спектральных классов при помощи калибровочных соотношений между M_V , $T_{эф}$ и отношениями глубин спектральных линий атомов железа, находящихся в основном и ионизированном состояниях. Калибровки получены по сверхгигантам Галактики, и вследствие этого их применение имеет ряд ограничений: звезды должны иметь нормальный химический состав, принадлежать к спектральным классам $F2-G8$ и иметь значения M_V от -0.5 до -8^m . При апробации методики на галактических цефеидах было выявлено, что методика применима для диапазона фаз изменения блеска $0.2-0.5$, в других же фазах получаются менее надежные значения. Возможно, это связано с динамическими эффектами в ат-

Таблица 6. Значения параметров цефеид Большого Магелланового Облака

Звезда	MJD	$T_{\text{эф}}$, К	P , сут	Источники P и T_0		V	Кривые блеска
HV 877	51828.17333	4831	45.160	[25]	0.65	13.6	OGLE
HV 879	51828.19063	5809	36.813	OGLE, [20]	0.55	13.5	[20]
HV 971	51858.19867	5943	5.175	OGLE	0.56	15.7	OGLE
HV 997	51858.30846	5782	13.143	OGLE	0.87	14.7	OGLE
HV 1023	51861.25453	5909	26.540	[8]	0.97	13.3	OGLE
HV 2260	51828.21202	5898	12.988	OGLE	0.93	14.7	OGLE
HV 2337	51860.15590	5489	6.863	OGLE	0.23	15.0	OGLE
HV 2352	51861.19069	6300	13.614	OGLE	0.86	14.2	OGLE
HV 2405	51859.19892	5985	6.924	OGLE	0.90	15.0	OGLE
HV 2580	51860.21278	5461	16.923	[25]	0.10	13.7	[25]
HV 2733	51827.32419	5473	8.722	OGLE, [20]	0.09	14.5	[20]
HV 2793	51860.27376	5505	19.222	OGLE	0.83	14.3	OGLE
HV 2827	51883.09222	4892	78.860	[20]	0.43	12.1	[20]
HV 2836	51860.31137	5471	17.530	[8]	0.04	14.1	[8]
HV 2864	51862.11220	5799	10.990	OGLE, [20]	0.77	14.8	[20]
HV 5497	51828.16668	5206	99.312	OGLE, [25]	0.69	12.2	[20]
HV 12452	51828.29756	5548	8.739	OGLE	0.48	15.0	OGLE

мосферах классических цефеид. Учитывая эти моменты и то, что сверхгиганты МО имеют заметный дефицит металлов, было решено дополнительно протестировать методику определения светимости на сверхгигантах МО, модули расстояний до которых достаточно надежно известны, для выявления границы применимости этой методики при низких металличностях.

Спектроскопические данные (глубины линий) и эффективные температуры, необходимые для вычисления M_V , были получены в ходе определения химического состава атмосфер. В табл. 6 представлены данные по цефеидам БМО из различных источников: название звезды, модифицированная юлианская дата, эффективная температура, период, фаза, видимая звездная величина, соответствующая рассчитанной фазе. В пятой и последней графе приведены источники кривых блеска и значений периода P и начального момента максимума T_0 , по которым и определялась фаза на момент времени наблюдений каждой из звезд MJD.

Из 21 исследованной в работе цефеиды БМО лишь для 17 были построены достаточно надежные кривые блеска, из них пять цефеид оказались в необходимом диапазоне фазы пульсации, для них и были рассчитаны M_V . К этому были добавлены данные из [4], что позволило определить M_V еще для четырех непериодических сверхгигантов БМО. В табл. 7 представлены наблюдаемые значения M_V (для непериодических сверхгигантов они взяты из работы [4], а для цефеид вычислены при помощи зависимости период — светимость [6]), вычисленные по

Таблица 7. Вычисленные данные для сверхгигантов Большого Магелланового Облака (N — число калибровок)

Звезда	M_V^{obs}	M_V^{calc}	N	V	$m - M$
G 244	-7.4	-7.6	14	11.2	18.8
G 258	-7.7	-7.7	32	10.9	18.6
G 396	-7.0	-6.5	36	11.6	18.1
G 406	-6.7	-6.2	45	11.9	18.1
HV 879	-5.5	-4.9	48	13.5	18.4
HV 971	-3.9	-3.0	48	15.7	18.7
HV 2337	-3.5	-3.2	27	15.0	18.2
HV 2827	-6.4	-6.0	7	12.1	18.1
HV 12452	-3.8	-3.7	56	15.0	18.7

предложенной методике значения M_V , количество N использованных калибровочных соотношений, видимые звездные величины V и вычисленные модули расстояния $m - M$ для каждой звезды. При усреднении данных из последнего столбца было получено значение модуля расстояния для БМО, равное $m - M = 18.4 \pm 0.3^m$. Это значение неплохо согласуется с другими оценками [6].

Для ММО число объектов оказалось недостаточным для получения сколько-нибудь определенных выводов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе высококачественных спектров проведен анализ химического состава атмосфер желтых сверхгигантов Магеллановых Облаков. Уточнены параметры атмосфер и впервые получено содержание 20 химических элементов. По исследованным в работе звездам БМО получено значение металличности -0.20 dex и -0.54 dex для ММО. Эти значения несколько выше традиционных, что может быть объяснено выборкой исследованных объектов. Из особенностей химического состава необходимо отметить, что Na не показывает избытка, однако небольшой избыток найден для некоторых α -элементов (Si и S), а также отмечен заметный избыток по отношению к железу элементов нейтронного захвата. Полученные результаты в целом хорошо согласуются с ранее опубликованными данными.

Наряду с анализом химического состава был произведен расчет абсолютных звездных величин для отдельных объектов БМО по методике, предложенной в работе [11]. Оценка модуля расстояния ($m - M = 18.4 \pm 0.3^m$) для БМО хорошо согласуется с опубликованными данными. Из этого можно сделать вывод, что методика определения светимости вполне применима для объектов из близлежащих галактик с небольшим дефицитом металличности. Погрешность определения

на сегодняшний день хотя и достаточно велика, но сопоставима с точностью альтернативных методов определения M_V и напрямую зависит от качества спектрального материала. Однако можно отметить, что для удаленных непеременных сверхгигантов предложенная методика в наше время является единственным способом оценки их светимости.

Автор благодарен В. В. Ковтюху за постановку задачи и полезные дискуссии. Работа была проведена частично при финансовой поддержке Национального научного фонда Швейцарии по гранту SCOPES № IZ73Z0—128180/1.

1. *Галазутдинов Г. А.* Система обработки звездных эшеле-спектров. — Нижний Архыз, 1992.—52 с.—(Препринт / Российская АН. Спец. астрофиз. обсерватория; № 92).
2. *Комаров Н. С., Згоняйко Н. С., Васильева С. В.* Содержание химических элементов в атмосферах К-сверхгигантов Малого Магелланового Облака // Кинематика и физика небес. тел.—2001.—17, № 5.—С. 471—477.
3. *Любимков Л. С.* Химический состав звезд: метод и результаты анализа. — Одесса: Астропринт, 1995.—324 с.
4. *Andrievsky S. M., Kovtyukh V. V., Korotin S. A., et al.* Magellanic Clouds elemental abundances from F supergiants: Revisited results for the Large Magellanic Cloud // *Astron. and Astrophys.*—2001.—367.—P. 605—612.
5. *Bagnullo S., Jehin E., Ledoux C., et al.* The UVES Paranal observatory project: A library of high-resolution spectra of stars across the Hertzsprung — Russel diagram // *ESO Messenger.*—2003.—114.—P. 10—14.
6. *Fouque P., Arriagada P., Storm J., et al.* A new calibration of Galactic Cepheid Period-Luminosity relations from B to K bands, and a comparison to LMC PL relations // *Astron. and Astrophys.*—2007.—476.—P. 73—81.
7. *Grevesse N., Noels A., Sauval A. J.* Standard Abundances // *Conf. College Park.*—1996.—99.—P. 117—120.
8. *Harris H. C.* Photometry of Cepheids in the LMC and Magellanic Cloud abundances // *Astron. J.*—1983.—88.—P. 507—517.
9. *Korn A. J., Becker S. R., Gummersbach C. A., et al.* Chemical abundances from Magellanic cloud B stars // *Astron. and Astrophys.*—2000.—353.—P. 655—665.
10. *Kovtyukh V. V.* High-precision effective temperatures of 161 FGK supergiants from line — depth ratios // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2007.—378.—P. 617—624.
11. *Kovtyukh V. V., Chekhonadskikh F. A., Luck R. E., et al.* Accurate luminosities for F—G supergiants from FeII/FeI line depth ratios // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2010.—408.—P. 1568—1575.
12. *Kovtyukh V. V., Andrievsky S. M.* Do we really obtain reliable elemental abundances for supergiant stars? // *Astron. and Astrophys.*—1999.—351.—P. 597—606.
13. *Kurucz R. L.* Model atmospheres for population synthesis // *The Stellar Populations of Galaxies: Symp. № 149.* — Kluwer Academic Publishers, 1992.—P. 225—232.
14. *Kurucz R. L.* ATLAS12, SYNTH3, ATLAS9, WIDTH9, et cetera // *Mem. S. A. It. Suppl.*—2005.—8.—P. 14—24.
15. *Kurucz R. L., Furenlid I., Brault J., et al.* The solar flux atlas from 296 nm to 1300 nm. — *Nat. Solar Observ. USA*, 1984.

16. *Larsen S. S., Clausen J. V., Storm J.* Reddenings and metallicities in the LMC and SMC from Strömgren CCD photometry // *Astron. and Astrophys.*—2000.—**364**.—P. 455—466.
17. *Lyubimkov L. S., Boyarchuk A. A.* Influence of deviations from LTE on the determination of the microturbulence in the atmospheres of F-type supergiants // *Astrophysics.*—1984.—**19**.—P. 385—390.
18. *Lyubimkov L. S., Boyarchuk A. A., Sakhbullin N. A.* Effects of deviations from local thermodynamic equilibrium in the atmospheres of F supergiants. Part I. Overionization of Fe I atoms // *Astrophysics.*—1985.—**21**.—P. 203—210.
19. *Luck R. E., Moffett T. J., Barnes T. G., et al.* Magellanic Cloud Cepheids: abundances // *Astrophys. J.*—1998.—**115**.—P. 605—634.
20. *Martin W. L., Warren P. R.* Multicolour photoelectric photometry of Magellanic Cloud Cepheids. Part One. Individual UBVI observations // *Circulars. South African Astron. Observ.*—1979.—**1**.—P. 98—111.
21. *Mucciarelli A., Cristallo S., Brocato E., et al.* NGC 1866: a milestone for understanding the chemical evolution of stellar populations in the Large Magellanic Cloud // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2011.—**413**, N 2.—P. 837—851.
22. *Pilyugin L. S.* The chemical evolution of irregular galaxies with mass loss // *Astron. and Astrophys.*—1994.—**287**, N 2.—P. 387—389.
23. *Romaniello M., Primas F., Mottini M., et al.* The influence of chemical composition on the properties of Cepheid stars. II. The iron content // *Astron. and Astrophys.*—2008.—**488**.—P. 731—747.
24. *Thevenin F., Idiart T. P.* Stellar iron abundances: non-LTE effects // *Astrophys. J.*—1999.—**521**.—P. 753—763.
25. *Van Genderen A. M.* VBLUW photometry of Cepheids in the Magellanic Clouds made in 1971—1978 // *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.*—1983.—**52**.—P. 423—442.
26. *Venn K. A.* A-type supergiant abundances in the Small Magellanic Cloud: probes of evolution // *Astrophys. J.*—1999.—**518**.—P. 405—421.

Поступила в редакцию 22.04.11