

УДК 524.3-32/74,524.68-74

КИНЕМАТИКА ЗВЕЗД С БОЛЬШИМИ СОБСТВЕННЫМИ ДВИЖЕНИЯМИ ПО СПЕКТРАМ ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ В НАЗЕМНОМ УЛЬТРАФИОЛЕТЕ

© 2010 В. Г. Клочкова*, Н. С. Таволжанская**

Специальная астрофизическая обсерватория, Нижний Архыз, 369167 Россия

Поступила в редакцию 29 апреля 2009 г.; принята в печать 20 октября 2009 г.

По спектральным наблюдениям, выполненным с эшелльным спектрографом НЭС 6-метрового телескопа БТА в диапазоне длин волн 3550–5100 Å со спектральным разрешением $R = 60000$, измерены лучевые скорости для 15 звезд с большими пространственными скоростями. Среднеквадратичное отклонение измеренных величин скорости не превышает $\sigma \leq 0.9$ км/с для звезд с металличностью $[\text{Fe}/\text{H}] \gtrsim -1$ и $\sigma \leq 1.1$ км/с для $[\text{Fe}/\text{H}] \lesssim -1$. Измеренные с высокой точностью гелиоцентрические скорости в сочетании с тригонометрическими параллаксами и собственными движениями из каталога HIPPARCOS позволили определить расстояния и параметры галактических орбит изученных звезд. В основном они расположены ближе 100 пк; подтверждена двойственность нескольких из изученных звезд.

Ключевые слова: *звезды — свойства и классификация*

1. ВВЕДЕНИЕ

Хронология формирования и последующей эволюции Галактики может быть восстановлена путем анализа параметров звезд, принадлежащих различным галактическим населением. Необходимы компоненты для определения принадлежности звезд к тому или иному типу населения в Галактике являются возраст, химический состав и кинематические характеристики (собственные движения μ и лучевые скорости V_{\odot}). Оптимальными зондами для изучения химического состава и измерения лучевых скоростей старых типов населений являются непроэволюционировавшие звезды поздних спектральных классов F–G. Эти маломассивные звезды, находящиеся в основном вблизи Главной Последовательности, эволюционируют медленно, поэтому их атмосферы имеют химический состав, соответствующий составу вещества, из которого эти звезды сформировались.

Заметим, что в данной задаче, помимо металличности звезды, необходимо получить содержание иных химических элементов (CNO, элементы α - и s -процессов). Набор этих данных позволяет фиксировать стадию эволюции индивидуальных звезд. Металличность и химический состав должны быть определены с высокой точностью, поскольку значения этих параметров при переходе от одной

галактической подсистемы к другой меняются в пределах ошибок их определения. Для более полной и надежной информации о химическом составе необходим анализ спектральных данных, полученных с высоким спектральным разрешением в широком интервале длин волн с высоким отношением сигнала к шуму (S/N).

F–G карлики и субкарлики, спектры которых изобилуют узкими и малоблендированными линиями, являются удобными объектами и для измерения лучевой скорости. При переходе от горячих звезд к звездам спектральных классов FGK средняя величина проекции скорости осевого вращения звезды на луч зрения ($V \sin i$) снижается, что приводит к необходимости наблюдений с более высоким спектральным разрешением. Роль взаимного блендирования спектральных линий также возрастает, поэтому для изучения второстепенных спектральных деталей в блендах требуется увеличивать отношение сигнал/шум (S/N) в спектре. Для поиска неблендированных линий необходимо регистрировать более широкий спектральный интервал. Ширина спектрального диапазона является определяющей и в том случае, когда необходимо получить информацию о линиях максимально большого числа элементов. При переходе к звездам со “сверхдефицитом” металлов интенсивности линий металлов становятся столь малыми, что для изучения основных характеристик распространенности химических элементов спектры следует получать в

*E-mail: valenta@sao.ru

**E-mail: tavalga@sao.ru

Таблица 1. Параметры звезд программы

Номер звезды		В зв. вел.	μ_α	μ_δ	π
HD/BD	из [2]		"/год [3]		" [3]
245	G265-1	9.02	331.45	-6.63	16.24
+71° 31	G242-65	10.61	324.97	92.50	6.04
5256	G265-5	9.51	310.23	79.80	11.19
+29° 366	G74-5	9.34	290.02	-265.76	17.66
19445	G37-26	8.51	-209.55	-830.33	25.85
22879	G80-15	7.23	689.67	-214.34	41.07
237354	G191-23	9.96	-59.56	-381.96	11.91
+80° 245	G251-54	10.57	136.81	-366.66	3.91
115444		9.70	5.10	-60.36	3.55
140283		7.69	-1115.54	-302.77	17.44
144061	G240-2	7.95	-59.70	253.89	34.35
148816	G17-21	7.81	-432.73	-1392.34	24.34
188510	G143-17	9.39	-37.80	289.57	25.32
215065	G241-18	8.05	217.26	338.34	34.05
215257	G27-44	7.93	150.64	331.61	23.66

синем и ультрафиолетовом диапазонах, где выше насыщенность спектра абсорбциями по сравнению с видимым диапазоном. Понятно, что спектрограф и светоприемник должны быть максимально эффективными именно в этих диапазонах.

В данной работе мы приводим величины гелиоцентрической скорости V_\odot , измеренные по спектральному материалу, использованному для составления Атласа [1]. В разделе 2 кратко описаны способы наблюдений и редукиции спектральных данных, в разделе 3 мы рассмотрим полученные результаты.

2. НАБЛЮДЕНИЯ И ОБРАБОТКА СПЕКТРОВ

В Табл. 1 приведены некоторые параметры изученных малометаллических звезд: их номера по каталогам (HD или BD), номера из Каталога звезд с большими собственными движениями ($\mu \geq 270''/\text{год}$) [2], звездные величины в полосе В, а также их собственные движения μ из Каталога миссии HIPPARCOS [3].

В последние десятилетия основной поток информации о кинематике звезд поставляют корреляционные методы измерения лучевых скоростей

(см., например, [4] и ссылки в этой работе). Эффективность этих методов снижается для звезд с экстремально низкой металличностью. Это снижение особенно присуще наблюдениям в видимом диапазоне длин волн, поскольку по мере снижения металличности все меньшее число линий попадает в выделенный для корреляции спектральный интервал. Изучение химического состава и измерение V_\odot у этого типа звезд целесообразно проводить по спектрам в коротковолновой области. Используя возможности 6-метрового телескопа в сочетании с кварцевым спектрографом, мы получили высококачественные спектры избранных малометаллических карликов в так называемом наземном ультрафиолете, $\lambda \approx 3500 - 5000 \text{ \AA}$. На основе данного спектрального материала ($S/N \geq 100$, спектральное разрешение $R = 60000$) ранее выполнено отождествление абсорбций и был изготовлен Атлас спектров [1]. Информативность ближнего УФ-диапазона для изучения спектров малометаллических звезд по сравнению с видимым диапазоном хорошо иллюстрирует Рис. 1 и 2, где представлены несколько фрагментов спектров для 4-х звезд программы, имеющих разную металличность.

Спектральные наблюдения выполнены в фокусе Нэсмита 6-метрового телескопа БТА Специальной

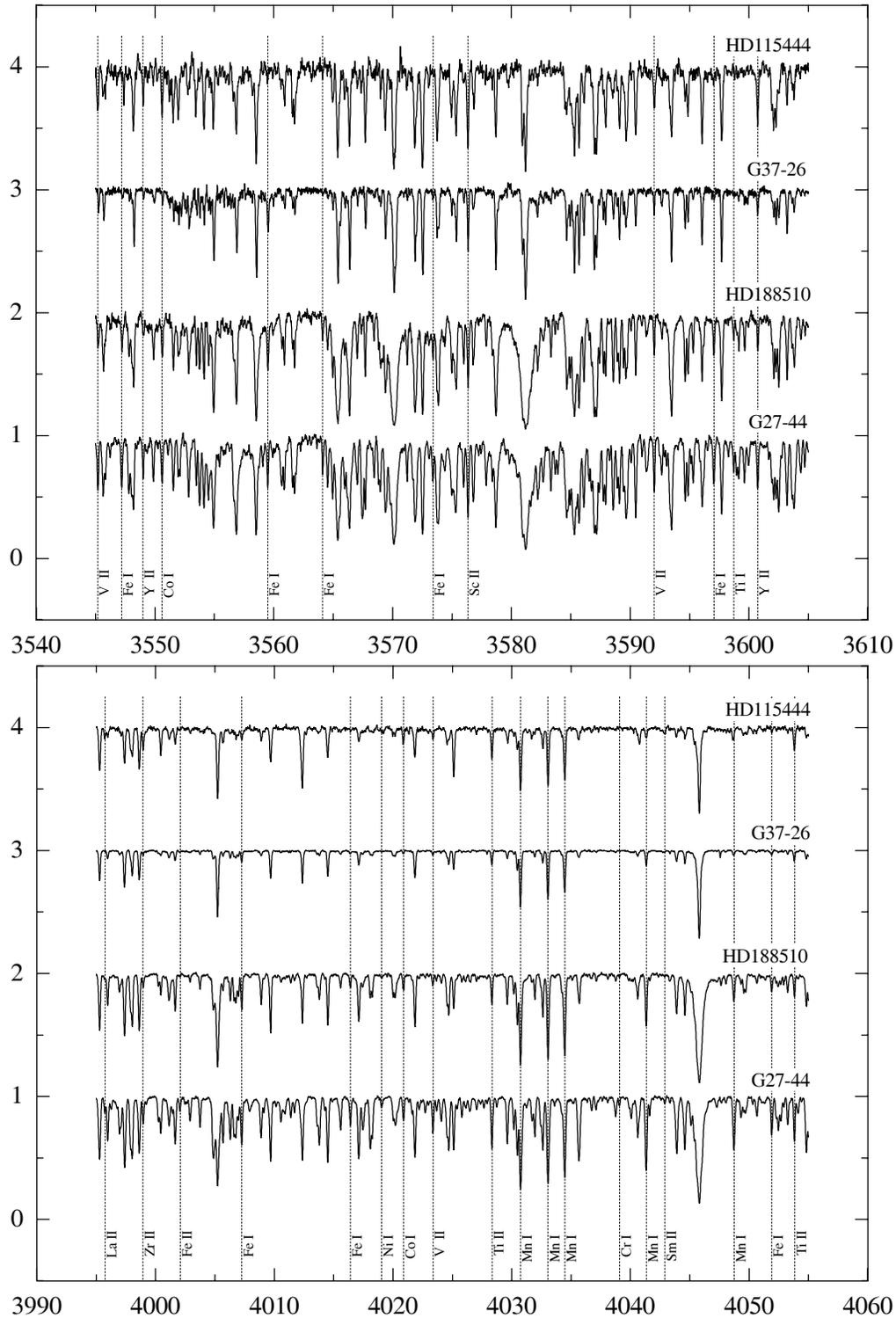


Рис. 1. Фрагменты спектров звезд программы в ближнем УФ- и видимом диапазоне. По оси ординат отложена относительная интенсивность, нормированная на континуум, по оси абсцисс — длина волны в ангстремах. Сверху вниз: HD 115444 ($[Fe/H] = -2.91$), G37-26 ($[Fe/H] = -2.04$), HD 188510 ($[Fe/H] = -1.52$) и G27-44 ($[Fe/H] = -0.60$) (все данные из работы [1]). Вертикальными линиями отмечены отождествленные абсорбции.

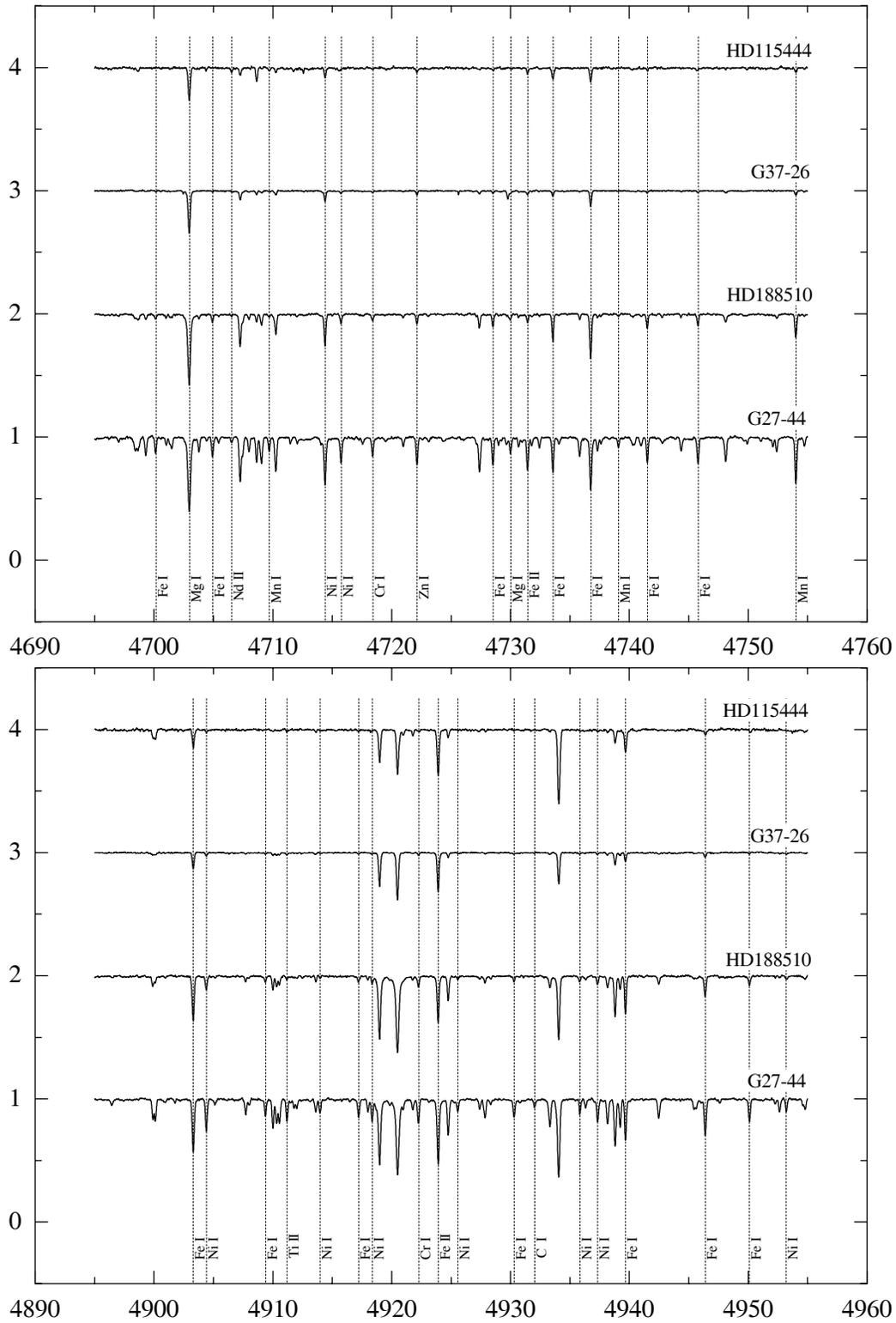


Рис. 2. То же, что на Рис. 1, но для других диапазонов длин волн.

Таблица 2. Гелиоцентрическая лучевые скорость V_{\odot} звезд программы. Указаны число индивидуальных линий, n , измеренных в спектрах, и среднеквадратичная ошибка измерения скорости σ . В последнем столбце отмечены двойные (bin) звезды или же заподозренные в двойственности (bin?)

HD/BD	JD2452...	V_{\odot} , км/с	σ , км/с	n	V_{\odot} , км/с	Двойственность
245	599.50	-75.8	1.0	639	-79.9 [14]	bin?
+71 31	516.39	-112.2	1.1	346	-122.1 [14]	bin
5256	600.25	11.1	1.1	643	12.0 [14]	
+29 366	599.30	29.2	0.9	574	27.1 [14]	
19445	162.51	-134.6	1.0	435	-140.5 [14]	bin?
22879	599.43	122.3	0.9	608	120.3 [14]	
237354	600.51	-107.9	1.0	622	-110.3 [14]	bin
+80 245	418.36	3.5	1.1	360	4.5 [14]	
115444	396.43	-24.5	1.0	415	-27.19 [15]	
140283	123.27	-167.9	0.8	224	-170.9 [14]	bin?
144061	421.40	-11.1	1.0	647	-8.7 [14]	
148816	420.44	-48.0	1.0	638	-47.9 [14]	
188510	162.34	-192.3	1.1	506	-192.8 [14]	
215065	601.16	-47.9	1.0	699	-47.5 [14]	
215257	123.50	-33.0	1.0	629	-33.6 [14]	

Астрофизической Обсерватории РАН с эшелльным спектрографом НЭС [5, 6]. Эшелле спектрограф НЭС работает на 6-м телескопе БТА с 1998 г., но только с 2001 г., после установки матрицы с высокой чувствительностью в ультрафиолете, он является эффективным средством наблюдений в коротковолновом диапазоне. Светоприемником служит матрица ПЗС Астрономической обсерватории университета г. Уппсала (Швеция), имеющая высокую чувствительность в синем и УФ-диапазонах [7]. Шум считывания составляет $7.7 e^-$, темновой ток — $1.5 e^-/ч$. Число светочувствительных элементов 2048×2048 , размер одного элемента 0.015×0.015 мм.

Параметры эшелле решетки и камеры таковы, что, в сочетании с матрицей ПЗС форматом 2048×2048 элементов, обеспечивается полное перекрытие соседних порядков эшелле спектра (в самых высоких УФ-порядках — двукратное перекрытие). Решетки скрещенной дисперсии сменные, 300 и 600 штр/мм. Шмидтовский корректор камеры и зеркало Манжена (мениск двойного хода в качестве касегреновского зеркала) изготовлены из плавленного кварца. Полеспрямляющая линза отсутствует, ее функции выполняет манженов-

ское зеркало. Защитное стекло криостата матрицы ПЗС — увиолевое. Квантовый выход используемой ПЗС-матрицы в ультрафиолете достигает 70%. В целом, оптический тракт спектрографа построен с минимальными потерями, в т.ч. и в ультрафиолете, для $\lambda \gtrsim 3000 \text{ \AA}$ [6, 8]. Система автоматического гидирования настраивается по фиолетовому участку изображения с учетом направления и величины вектора атмосферной рефракции. Спектральное разрешение составляет $R \geq 60000$.

Для исключения следов космических частиц и повышения отношения S/N мы получали как минимум две экспозиции для каждого объекта. Обработка двумерных эшелле-кадров (вычитание темновых кадров, очистка от космических частиц, калибровка длин волн, экстракция одномерных векторов) проводилась с помощью модифицированного [9] контекста ECHELLE комплекса программ MIDAS. Удаление следов космических частиц проводилось медианным усреднением двух спектров, полученных последовательно один за другим. Источником спектра сравнения служила торий-аргоновая лампа.

Полученные по этим спектрам и приводимые ниже в Табл. 2 гелиоцентрические лучевые ско-

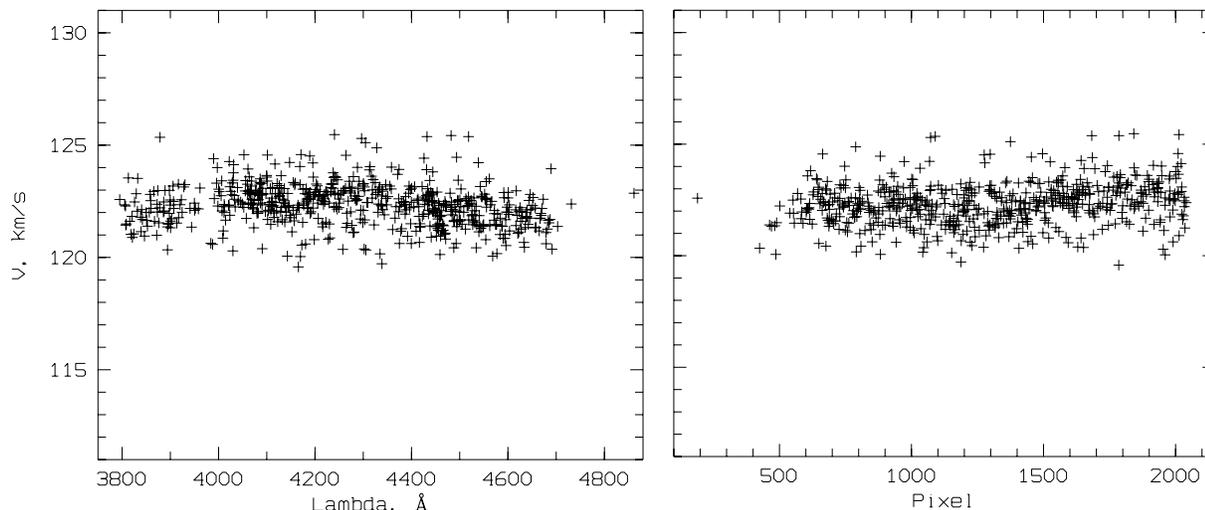


Рис. 3. Гелиоцентрическая лучевая скорость, измеренная по индивидуальным абсорбционным линиям в спектре G80-15, в зависимости от длины волны соответствующей линии (левая панель) и от координаты линии на эшелюном порядке (правая).

рости V_{\odot} найдены путем совмещения прямых и зеркальных изображений профилей линий [10]. Исследования позиционной нестабильности спектрографа [11] показали, что основной источник позиционной нестабильности сосредоточен не в оптико-механической конструкции спектрографа, а в модуле светоприемника, матрицы ПЗС, т.е. измерительное устройство (матрица) является менее точным, чем элементы конструкции спектрографа.

Список спектральных линий был составлен с использованием базы данных VALD [12, 13]. По солнечному спектру высокого разрешения из более чем 8100 первоначально отобранных линий нами было оставлено около 860 неблендированных линий, оптимальных для позиционных измерений. Подготовленный таким образом список линий и весь спектральный атлас [1] доступны по Web-адресу <http://www.chjaa.org>.

3. ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

3.1. Лучевая скорость звезд

В Табл. 2 полученные нами гелиоцентрические скорости V_{\odot} звезд программы сопоставлены с опубликованными ранее [14, 15] величинами V_{\odot} . Здесь же указаны число индивидуальных линий, n , измеренных нами в спектрах, и среднеквадратичная ошибка измерения скорости $\sigma = 0.8\text{--}1.1$ км/с. При числе измеренных линий в несколько сотен ошибка среднего значения V_{\odot} составляет 37–58 м/с в зависимости от количества измеренных линий, зависящего в основном от эффективной температуры и металличности звезды. На Рис. 3 показаны величины скорости V_{\odot} , измеренные по индивидуальным абсорбциям в спектре

G80-15, в зависимости от длины волны использованной линии и от координаты этой линии на эшелюном порядке. Из этого рисунка можно сделать вывод об отсутствии значимых методических трендов скорости.

Достигнутая нами точность измерений существенно выше, чем в цитированном обзоре [4], где ошибка индивидуального измерения V_{\odot} составляет 1–1.5 км/с. Ясно, эта погрешность характеризует только внутреннюю точность позиционных измерений. Для абсолютной привязки измерений лучевых скоростей по коротковолновому интервалу длин волн необходимо провести измерения V_{\odot} для звезды-стандарта лучевой скорости. В качестве такого стандарта мы использовали Вега, получив ее спектр в той же наблюдательной моде, что и для звезд программы. Измерив положение около 420 линий в спектре Веги, получили для нее $V_{\odot} = -14.1$ км/с. В Каталоге лучевых скоростей [16] среднее значение скорости для этой звезды $V_{\odot} = -13.8$ км/с. Разброс ее скорости в различных работах (с 1981 по 1990 г.г.) находится в интервале $V_{\odot} = -12.10 \dots -15.50$ км/с. Таким образом, можно утверждать, что измеренные нами в УФ-диапазоне длин волн скорости не содержат заметной систематической ошибки.

У трех из наших объектов (звезды G242-65, G37-26 и HD 140283) авторами работы [17] была заподозрена переменность скорости, а G265-1 отнесена к вероятным двойным. Позже Лэтем и др. [4] отнесли к подтипу спектрально-двойных SB1 и определили элементы орбиты для двух наших звезд, G265-1 и G191-23. Из сопоставления измеренных нами и ранее опублико-

Таблица 3. Расстояния, компоненты скорости и параметры орбиты звезд

HD/BD	$d \pm \sigma$ пк	U км/с	V км/с	W км/с	V_{lsr} км/с	e	Z кпк
245	61.58±2.7	-46.94	-103.62	-46.43	108.46	0.437	0.60
+71 31	165.56±32.4	-171.12	-231.17	10.98	274.16	0.993	8.80
5256	89.37±6.7	-103.08	-77.04	44.23	125.23	0.440	1.06
+29 366	56.63±5.5	-63.13	-72.47	-52.50	94.27	0.342	0.77
19445	38.68±1.7	152.54	-120.13	-71.02	206.82	0.613	1.52
22879	24.35±0.5	-109.95	-74.14	-65.71	132.93	0.447	1.29
237354	83.96±11.4	32.46	-138.44	-122.78	178.71	0.489	3.98
+80 245	255.75±88.4	-198.86	-366.70	225.58	465.33	0.693	22.98
115444	281.69±97.0	53.67	64.14	-11.96	83.79	0.262	0.29
140283	57.34±3.2	-265.36	-237.46	-3.33	341.98	0.996	15.83
144061	29.11±1.0	-30.56	-5.52	-21.28	26.00	0.140	0.18
148816	41.08±1.5	79.58	-262.58	-87.06	279.98	0.904	5.15
188510	39.49±1.8	-167.42	-104.64	31.41	187.45	0.640	0.78
215065	29.37±0.5	-34.85	-63.74	12.12	61.92	0.266	0.25
215257	42.27±1.7	-68.25	18.76	37.45	78.15	0.303	0.97

ванных величин V_{\odot} мы подтверждаем вероятную двойственность перечисленных объектов.

3.2. Расстояния и пространственные скорости

Используя точные тригонометрические параллаксы π из каталога HIPPARCOS [3], мы определили расстояния до звезд нашей программы. Полученные величины d в парсеках приведены в Табл. 3. Как видно из нее, изучаемые звезды в основном расположены ближе 100 пк. Лишь три звезды, обладающие малыми параллаксами и, следовательно, большими ошибками расстояния, лежат вне 100 пк окрестности Солнца. Ясно, что близкие к Солнцу звезды преимущественно принадлежат населению галактического диска, однако какая-то часть их является звездами гало. Для классификации звезд по типам населения необходимо получить дополнительные сведения: металличность, удаленность от плоскости диска, кинематические параметры. Точные собственные движения и параллаксы из каталога [3] в сочетании с измеренными нами лучевыми скоростями звезд позволяют определить компоненты полной пространственной скорости: U — скорость в направлении центра Галактики, V — скорость в направлении вращения Галактики,

W — скорость в направлении полюса Галактики. Все необходимые расчеты были любезно проведены для нас В. А. Марсаковым (Южный Федеральный Университет, Ростов-на-Дону). Детали расчета и использованной модели распределения масс в Галактике описаны в работе [18]. Здесь отметим моменты, принципиальные для расчета галактических орбит звезд. Компоненты галактоцентрической скорости U , V , W , также скорости звезд по отношению к локальному стандарту скоростей V_{lsr} и параметры их галактических орбит рассчитаны с компонентами пекулярной скорости Солнца: $(-11, +14, +7.5)$ км/с, его галактоцентрическим расстоянием $R = 8.5$ кпк [19] и скоростью вращения Галактики на солнечном галактоцентрическом расстоянии 220 км/с. В Табл. 3 приведены результаты расчетов: компоненты галактоцентрической скорости U , V , W , скорость звезд по отношению к локальному стандарту скоростей V_{lsr} , эксцентриситеты орбит e и максимальная удаленность орбиты от плоскости Галактики Z . Как показывают расчеты, основной вклад в погрешность определения расстояний и кинематических параметров дает неточность параллаксов.

Полученные расстояния до звезд и их пространственные скорости являются необходимыми,

но недостаточными параметрами для определения принадлежности объекта к той или иной подсистеме Галактики (тонкий диск, толстый диск, гало, аккрецированное гало). Согласно современным представлениям о формировании иерархии населений спиральных галактик, помимо металличности, расстояния и кинематических характеристик звезды, для определения ее принадлежности к конкретному типу населения необходима детальная картина распространенности химических элементов в атмосфере звезды (содержания элементов α - и s -процессов) [20]. Поэтому следующим нашим шагом изучения полученных спектров в УФ-диапазоне будет определение химического состава субкарликов методом моделирования атмосфер.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований (проект №07–02–00247 а) и программы Президиума РАН “Происхождение и эволюция звезд и галактик”. В работе использованы данные из баз SIMBAD и SAO/NASA ADS.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. V. E. Klochkova, G. Zhao, S. V. Erмаков, and V. E. Panchuk, *Chin. J. Astronom. and Astrophys.* **6**, 579 (2006).
2. H. L. Giclas, R. Burnham, and N. G. Thomas, *Lowell Proper Motion Survey, Northern hemisphere. The G numbered stars* (Lowell Observatory, Flagstaff, Arizona, 1971).
3. M. A. C. Perryman, L. Lindegren, J. Kovalevsky, et al., *Astronom. and Astrophys.* **323**, L49 (1997).
4. D. W. Latham, R. P. Stefanik, G. Torres, et al., *Astronom. J.* **124**, 1144 (2002).
5. V. E. Panchuk, V. G. Klochkova, M. V. Yushkin, and I. D. Najdenov, in *Proceedings of the Joint Discussion No. 4 during the IAU General Assembly of 2006*. (Editorial Complutense, Madrid, 2007), p.179.
6. В. Е. Панчук, В. Г. Клочкова, М. В. Юшкин и И. Д. Найденев, *Оптический журн.* **76**, 42 (2009).
7. В. Е. Панчук, Н. Е. Пискунов, В. Г. Клочкова и М. В. Юшкин, *Препринт Спец. Астрофиз. Обсерв. № 169* (САО РАН, Ниж. Архыз, 2002).
8. V. E. Panchuk, V. G. Klochkova, M. V. Yushkin, and M. V. Yakorov, *Astrophysical Bulletin* **64**, 392 (2009).
9. М. В. Юшкин и В. Г. Клочкова, *Препринт Спец. Астрофиз. Обсерв. № 206* (САО РАН, Ниж. Архыз, 2005).
10. Г. А. Галазутдинов, *Препринт Спец. Астрофиз. Обсерв. № 92* (САО РАН, Ниж. Архыз, 1992).
11. V. G. Klochkova, V. E. Panchuk, M. V. Yushkin, and D. S. Nasonov, *Astrophysical Bulletin* **63**, 386 (2008).
12. N. E. Piskunov, F. Kupka, T. A. Ryabchikova, et al., *Astronom. and Astrophys. Suppl. Ser.* **112**, 525 (1995).
13. F. Kupka, N. E. Piskunov, T. A. Ryabchikova, et al., *Astronom. and Astrophys. Suppl. Ser.* **138**, 119 (1999).
14. B. W. Carney, D. W. Latham, J. B. Laird, and L. A. Aguilar, *Astronom. J.* **107**, 2240 (1994).
15. B. Famaey, A. Jorissen, X. Luri, et al., *Astronom. and Astrophys.* **430**, 165 (2005).
16. M. Barbier-Brossat and P. Figon, *Astronom. and Astrophys. Suppl. Ser.* **142**, 217 (2000).
17. B. W. Carney and D. W. Latham, *Astronom. J.* **92**, 116 (1987).
18. Т. В. Боркова и В. А. Марсаков, *Письма в АЖ* **30**, 173 (2004).
19. K. U. Ratnatunga, J. N. Bahcall, and S. Casertano, *Astrophys. J.* **339**, 106 (1989).
20. R. G. Gratton, E. Carretta, R. Claudi, et al., *Astronom. and Astrophys.* **404**, 187 (2003).

KINEMATICS OF HIGH PROPER MOTION STARS DETERMINED FROM HIGH RESOLUTION SPECTRA IN GROUND-BASED ULTRAVIOLET

V. G. Klochkova, N. S. Tavganskaya

Radial velocities for 15 stars with high proper motions were measured as a result of spectral observations, conducted with the NES echelle spectrograph of the 6-m BTA telescope in the wavelength range of 3550–5100 Å with a spectral resolution of $R = 60000$. The standard deviation of the measured velocity does not exceed $\sigma \leq 0.9$ km/s for the stars with metallicity $[\text{Fe}/\text{H}] \gtrsim -1$, and $\sigma \leq 1.1$ km/s for $[\text{Fe}/\text{H}] \lesssim -1$. The heliocentric velocities measured with high accuracy in combination with trigonometrical parallaxes and proper motions from the HIPPARCOS catalog allowed us to determine the distances and parameters of the galactic orbits of the stars under study. In general they are located within 100 pc; the binarity of several program stars is confirmed.

Key words: *stars — properties, classification*