

УДК 524.316-355.2.082

Ю. П. Любчик¹, Е. Мартин², Г. Басри³, Я. В. Павленко¹

¹Главная астрономическая обсерватория НАН Украины,
03680, ГСП, Киев, ул. Академика Заболотного 27

²Institute for Astronomy, University of Hawaii at Manoa,
2680 Woodlawn Drive, Honolulu HI 96822

³Astronomy Department, University of California,
Berkeley, CA 94720

Анализ спектров двух двойных систем звезд солнечного типа

Обсуждаются методика и результаты определения содержания химических элементов Li, Ca, Al, Si, Fe в атмосферах двойных звезд HD 6872 A, HD 6872 B и HD 224984, HD 224994. Все они являются карликами спектральных классов G и F. Анализ производился методом синтетических спектров. Расчеты выполнены для моделей атмосфер Куруца с металличностями $[\mu] = 0...-0.2$ с исправленным по солнечному атласу списком атомных линий VALD. Моделировались спектры звезд, полученные с разрешением $\lambda/\delta\lambda = 55000$. Значения содержания лития $\lg N(\text{Li})$ оказались равными 2.3 для HD 224984 и HD 224994, менее 1.8 для HD 6872 A и 2.6 для HD 6872 B. Для компонента HD 6872 A определен параметр вращения $v \sin i = 14$ км/с.

АНАЛІЗ СПЕКТРІВ ДВОХ ПОДВІЙНИХ СИСТЕМ ЗІРОК СОНЯЧНОГО ТИПУ, Любчик Ю. П., Мартін Є., Басрі Г., Павленко Я. В. — Обговорюються методика та результати визначення вмісту хімічних елементів Li, Ca, Al, Si, Fe в атмосферах подвійних зірок HD 6872 A, HD 6872 B та HD 224984, HD 224994. Всі вони є карликами спектральних класів G та F. Аналіз проводився методом синтетичних спектрів. Розрахунки виконані для моделей атмосфер Куруца з металічностями $[\mu] = 0...-0.2$ по виправленому за сонячним атласом списку атомних ліній VALD. Моделювалися спектри зірок, отримані з роздільною здатністю $\lambda/\delta\lambda = 55000$. Значення вмісту літію $\lg N(\text{Li})$ виявились рівними 2.3 для HD 224984 і 224994, менше від 1.8 для HD 6872 A і 2.6 для HD 6872 B. Для компонента HD 6872 A визначено параметр обертання $v \sin i = 14$ км/с.

ANALYSIS OF THE SPECTRA OF TWO SOLAR-LIKE BINARIES, by Lyubchik Yu. P., Martin E., Basri G., Pavlenko Ya. V. — Procedure and results of Li, Ca, Al, Si, and Fe abundance determinations in the atmospheres of the solar-type components of the binaries HD 6872 A, HD 6872 B and HD 224984, HD 224994 are described. These stars are dwarfs of spectral types G and F. Synthetic spectrum method was used to analyse their spectra. Kurucz's (2000) model atmospheres of metallicities $[\mu] = 0...-0.2$ and the atomic line

list VALD verified by the solar spectrum are used for computations of the synthetic spectra. Theoretical spectra were fitted to the observed HD 6872 A, HD 6872 B and HD 224984, HD 224994 spectra ($\lambda/\delta\lambda = 55000$). We determined the same lithium abundances ($\log N(\text{Li}) = 2.3$) in the atmospheres of HD 224984 and HD 224994. For HD 6872 A and HD 6872 B we determined different lithium abundances — $\log N(\text{Li}) < 1.8$, and $\log N(\text{Li}) = 2.6$, respectively. For HD 6872 A we determined $v \sin i = 14$ km/s.

ВВЕДЕНИЕ

В последнее десятилетие благодаря оснащению крупных телескопов (Keck, VLT) современными спектрографами удалось достичь спектрального разрешения $\lambda/\delta\lambda = 10^5$ даже при наблюдениях относительно слабых звезд-карликов, что в ряде случаев сравнимо с разрешением солнечных атласов. При обработке таких спектров требуются методики особо тщательного воспроизведения отдельных линий и блендов, что, в свою очередь, требует существенного повышения быстродействия алгоритмов. К настоящему времени эта задача решена в ряде программ, реализующих алгоритмы минимизации суммы разностей интенсивностей спектральных линий в наблюдаемом и рассчитанных спектрах.

Полученные спектры высокого разрешения могут быть использованы во многих задачах. Особый интерес представляет анализ спектров компонентов двойных систем и проверка разных моделей эволюции звезд. Если допустить, что эволюция звезды определяется ее массой, возрастом и первоначальным химическим составом, то все дальнейшие изменения физических характеристик в парах с подобными компонентами должны происходить одинаково. Однако, как было показано недавно, так происходит не всегда. Два компонента А и В пары 16 Суг имеют идентичные температуры и ускорения свободного падения ($T_{\text{эф}} = 5785$ и 5747 К, $\lg g = 4.28$ и 4.35 соответственно). При этом они имеют два существенных различия. Во-первых, серьезное различие содержания лития в атмосферах компонентов [12]: $\lg N(\text{Li}) = 1.27$ и менее 0.6 соответственно (солнечное содержание лития составляет 1.16 ± 0.1 [9]). Во-вторых, рядом с компонентом В была обнаружена планета-гигант в полтора раза массивнее Юпитера, эксцентриситетом орбиты $e = 0.63$ и периодом 800.8 сут [11]. В то же время никаких планет или пылевого диска вокруг компонента А пока не обнаружено. Для выяснения вопроса, насколько типична подобная ситуация, и объяснения таких аномалий необходимо изучение как можно большего числа двойных систем с подобными или идентичными компонентами.

В нашей работе преследовались две цели: определение основных характеристик атмосфер ($T_{\text{эф}}$, $\lg g$, $[\mu]$) и содержаний химических элементов для выбранных звезд, а также разработка алгоритма анализа новых спектров высокого разрешения.

НАБЛЮДЕНИЯ И МЕТОДИКА РАСЧЕТОВ

Наблюдения двух пар двойных систем звезд солнечного типа HD 6872 А, HD 6872 В и HD 224984, HD 224994 были получены на телескопе Lick Hamilton в период январь 1998 — февраль 1999 гг. с разрешением $\lambda/\delta\lambda = 55000$. Анализировался участок спектра $\lambda\lambda 669\text{—}673$ нм, который традиционно представляет интерес для определения содержания лития по резонансной линии $\lambda 670.8$ нм.

Для определения континуума в эшелельных спектрах использовался программный комплекс DECH20 [2]. Для уменьшения влияния шума

наблюдаемые спектры сглаживались по трем точкам, а затем по найденным точкам методом сплайновой аппроксимации проводился континуум.

Расчеты проводились в рамках классических предположений о ЛТР, плоскопараллельной атмосфере и отсутствии источников и стоков энергии. Методика достаточно подробно описана в работах [5, 16]. Для расчета синтетических спектров и определения содержания химических элементов использовались программы WITA612 [6] и ABEL8 (Я. В. Павленко). Программа WITA612 использовалась для предварительного определения $T_{\text{эф}}$, $[\mu]$ и $\lg N(\text{Li})$. В дальнейшем расчеты проводились по программе ABEL8, которая позволяет не только рассчитывать синтетические спектры, но и переопределять в ходе расчетов содержание химических элементов, сильные и умеренные спектральные линии которых наблюдаются на рассматриваемом участке.

В качестве нулевого приближения принималось солнечное содержание химических элементов [9]. Атомные данные и значения постоянных затухания были взяты из базы данных VALD [13]. Для некоторых линий в VALD нет данных о постоянных затухания, и в этом случае для их расчета использовалась приближенная функция, описанная в работе [7]. Кроме того, при сравнении теоретического спектра $T_{\text{эф}}/\lg g \equiv 5770/4.44$, рассчитанного с использованием атомных данных из VALD, со спектром Солнца [15], мы обнаружили довольно существенные отклонения для некоторых линий. Новые значения gf для них были взяты из работы [4]. Список отождествленных атомных линий на участке длин волн $\lambda\lambda$ 670—672 нм со старыми (VALD) и новыми значениями gf приведен в табл. 1.

Синтетические спектры считались с шагом 2 пм. Для всех синтетических спектров влияние инструментального уширения и макротурбулентности моделировались посредством свертки теоретических спектров с гауссианами (полуширины 10—12 пм). Расчеты проводились для значения микротурбулентной скорости $v_t = 2$ км/с. Профиль каждой линии поглощения определялся функцией Фойгта. Профили линий звезды HD 6872 A значительно уширены, и для их описания учитывалось уширение линий вращением с параметром $v \sin i = 14$ км/с. Уширение профилей линий в синтетическом спектре учитывалось по формуле, описанной в работе [3].

Таблица 1. Список идентифицированных линий с изменениями в gf

Химический элемент	λ , нм	gf , 0.001	
		VALD	[4]
Si	669.6044	14.79	—
	672.1848	32.36	70.79
Ni	669.0770	5.620	—
	669.6023	41.70	26.30
Al	669.8673	17.80	12.59
	671.7681	253.5	—
Ca	669.6320	21.38	—
	669.9142	7.925	—
Fe	670.4481	2.188	—
	670.5101	31.90	64.00
	670.7432	4.470	—
	671.3046	30.90	25.11
	671.3195	2.754	—
	671.3745	50.10	29.51
	671.5383	22.91	—
	671.6237	12.02	—
	671.7298	11.07	—
	672.4082	30.13	—

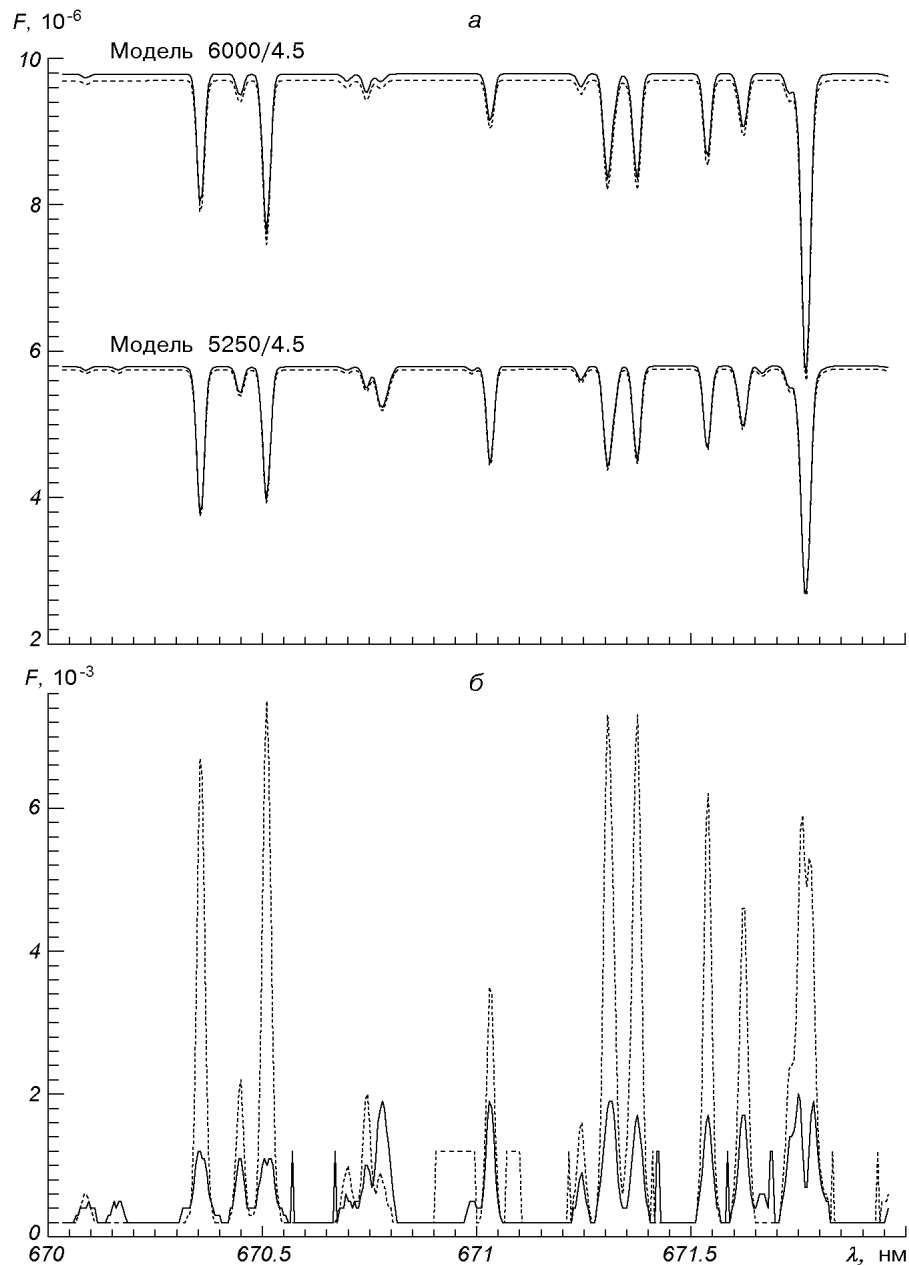


Рис. 1. *а* — Синтетические спектры для $T_{\text{эф}} = 6000$ и 5250 К и $\lg g = 4.5$, рассчитанные при приближении проникающей конвекции (сплошная линия) и приближении теории длины перемешивания (штриховая линия); *б* — разности потоков, рассчитанных с различными приближениями конвекции: сплошная линия — модель 5250/4.5, пунктир — 6000/4.5

Для расчетов синтетических спектров мы использовали модели атмосфер Куруца с металличностями $[m/H]$ от 0 до -0.2 [14]. Так как рассматриваемые звезды находятся в окрестностях Солнца и заведомо принадлежат к классу карликов, то для их атмосфер было принято значение $\lg g = 4.5$. В этих моделях применялось приближение проникающей конвекции, что приводит к повышению потока в атмосфере над верхней границей номинальной зоны конвекции, которая определяется критерием Шварцшильда. Как показали расчеты синтетических спектров при различных

приближениях учета конвекции (проникающая конвекция и классическая теория длины перемешивания), для интервала температур $T_{\text{эф}} = 5250...6500$ К различия незначительны (рис. 1).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Выбор $T_{\text{эф}}$ для наблюдаемых звезд производился по данным астрометрических каталогов (включая HIPPARCOS) по программам, любезно предоставленным нам Н. В. Харченко. По данным каталогов были определены значения $B - V$ для наблюдаемых звезд, а по зависимости $B - V$ от $T_{\text{эф}}$, построенной по данным [1], определялись значения эффективных температур, на которые мы затем опирались при выборе моделей атмосфер звезд (данные [1] в области $T_{\text{эф}} = 6000$ К почти идентичны более поздним данным [10] (рис. 2), что косвенно подтверждает правильность нашего выбора). Затем данные о спектральных типах звезд сравнивались с данными других исследований, ссылки на которые приведены в базе Simbad (<http://cdsweb.u-strasbg.fr/Simbad.html>). Для пары HD 6872 A и HD 6872 B мы получили тот же спектральный тип F8, что и в работе [18]. Для пары HD 224984 и HD 224994 получены спектральные типы F9.5 и G0.5 (в работе [18] — соответственно F8 и G0). Полученные значения содержаний Li, Al, Ca, Si, Fe, а также других параметров, приведены в табл. 2. Для лития определялись НЛТР-поправки по сетке кривых роста из [17] и приводятся НЛТР-значения содержания.

На рис. 3 представлены результаты сравнения наблюдаемых спектров двойных звезд с синтетическими спектрами.

Содержание лития в компонентах пары HD 224984, HD 224994 идентично и равно $\lg N(\text{Li}) = 2.3$ (в относительной логарифмической шкале, где $\lg N(\text{H}) = 12.00$), что не противоречит современным представлениям об эволюции компонентов двойных с одинаковыми массами, возрастами и первоначальными химическими составами.

Таблица 2. Характеристики и содержания $\lg N$ элементов анализируемых звезд

HD	Sp	$T_{\text{эф}}$, К	[m/H]	$\lg N$				
				Li	Si	Al	Ca	Fe
HD 6872 A	F8	6250	-0.2	< 1.8	7.5	6.05	6.24	7.4
HD 6872 B	F8	6250	-0.2	2.6	7.4	6.15	6.14	7.4
HD 224984	F8	6000	-0.1	2.3	7.5	6.25	6.24	7.5
HD 224994	G0	6000	-0.1	2.3	7.4	6.25	6.24	7.5
Солнце					7.51	6.43	6.32	7.63

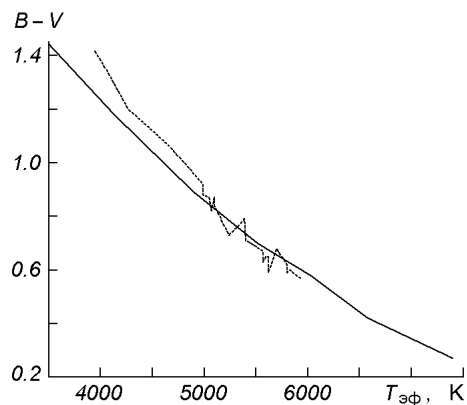


Рис. 2. Зависимости $B - V$ от эффективной температуры $T_{\text{эф}}$ по данным [1] (сплошная линия), и [10] (штриховая)

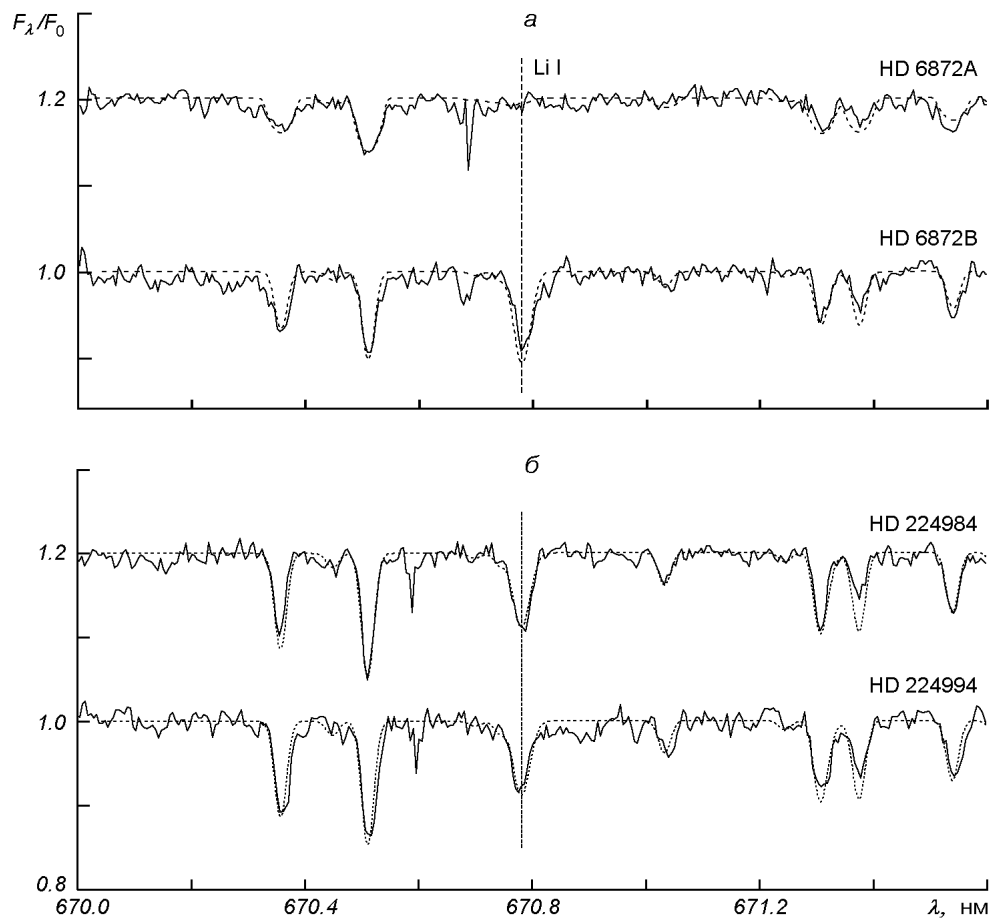


Рис. 3. Наблюдаемые (сплошная линия) и рассчитанные (пунктирная линия) нормализованные потоки F_λ/F_0 излучения звезд: а — HD 6872 А и В (модель $T_{\text{эф}}/\lg g/[\text{m}/\text{H}] = 6250/4.5/-0.2$), б — HD 224984 и HD 224994 (модель $6000/4.5/-0.1$)

В компонентах другой пары содержания лития существенным образом различаются: для HD 6872 А $\lg N(\text{Li}) < 1.8$, в то же время для HD 6872 В $\lg N(\text{Li}) = 2.6$. Подробно различия содержаний лития в этой паре, наряду с возможными причинами различий скорости выгорания лития в подобных звездах будут обсуждены в других работах.

При оценке достоверности полученных результатов необходимо учитывать ряд факторов.

Проблема непрерывного спектра. Наши исследования основаны на сравнении рассчитанных и наблюдаемых спектров в виде остаточных потоков $r_\lambda = F_\lambda/F_c$. Исследованная область расположена в красной области оптического диапазона и содержит относительно небольшое число линий поглощения, так что их влияние на определение теоретического континуума не может быть таким существенным, как в УФ-диапазоне [8]. К сожалению, процедуру определения непрерывного спектра не удастся формализовать полностью, однако малое число линий дает возможность надеяться, что континуум проведен достаточно уверенно. По нашим оценкам, неопределенность проведения непрерывного спектра сравнима с влиянием проникающей конвекции на потоки в теоретическом спектре.

Модели атмосфер. Нами использовались модели атмосфер, рассчитанные в рамках классических приближений. Они достаточно хорошо описывают физическое состояние атмосфер звезд спектральных типов *F*, *G*, в частности Солнца. С другой стороны, мы используем слабые линии поглощения или линии умеренной интенсивности, для которых не существенно влияние различий строения использующихся атмосфер, обусловленных, например, наличием хромосфер. Тем более, что содержание элементов в этом случае (за исключением лития) определялось по субординатным линиям. Сами линии лития оказываются весьма нечувствительными к температурным неоднородностям верхних слоев атмосфер, особенно при учете эффектов отклонения от ЛТР [8]. В атмосферах звезд солнечного типа НЛТР-эффекты в ненасыщенных линиях лития незначительны — в нашем случае они не превышали 0.1—0.15 dex.

Списки линий. Мы использовали компилятивный список атомных линий, составленный по данным различных исследований. При верификации этого списка использовались две процедуры. На первом этапе мы добивались удовлетворительного описания солнечного спектра с использованием классической модели атмосферы этой звезды. На конечном этапе нами использовались линии поглощения атомов, интенсивности которых изменялись сообразно при изменении эффективных температур звезд. Молекулярные линии не учитывались. Наши оценки показывают, что в спектрах звезд солнечного типа в области резонансной линии лития молекулярный спектр, представленный в основном линиями CN, не столь интенсивен ($d < 1\%$). В нашем случае отдельные линии поглощения молекул не выделялись на фоне шума. Вместе с тем молекулярные линии, расположенные в УФ-спектре даже этих относительно горячих звезд, также могут использоваться для количественного анализа содержания легких элементов. Собственно говоря, именно комплексный анализ содержания C, N, O и Li может дать новые знания о природе процессов в этих звездах и их эволюции. Более полное обсуждение полученных результатов будет проведено в отдельной статье. Существование двойных систем, в атмосферах которых наблюдаются разные содержания лития, представляет вызов нашим представлениям об эволюции звезд. Для окончательных выводов требуются дальнейшие исследования комплексного характера. Целесообразно наряду с литием определять содержание C, N, O, B и Be, поскольку именно они позволяют отслеживать процессы звездной эволюции.

Авторы признательны авторам VALD за возможность использования атомных данных и качественный сервис, а также Р. Куруцу за модели атмосфер звезд. Авторы благодарят Н. В. Харченко за предоставленные данные астрометрических каталогов и программы, а также Г. А. Галазутдинова за программу обработки спектров DECH20. Исследования Я. Павленко частично обеспечивались SRG грантом Американского Астрономического общества.

1. Аллен К. У. Астрофизические величины. — М.: Мир, 1997.—448 с.
2. Галазутдинов Г. А. Система обработки звездных эшелле-спектров. I. Обработка изображений. II. Обработка спектров. — Нижний Архыз, 1992.—52 с. —(Препринт / Спец. астрофиз. обсерватория РАН; № 92).
3. Грей Д. Наблюдения и анализ звездных фотосфер. — М.: Мир, 1980.—496 с.
4. Гуртовенко Э. А., Костык Р. И. Фраунгоферов спектр и система солнечных сил осцилляторов. — Киев: Наук. думка, 1989.—200 с.
5. Любчик Ю. П., Павленко Я. В. Моделирование оптических спектров поздних M-карликов // Кинематика и физика небес. тел.—2000.—16, № 4.—С. 324—335.
6. Павленко Я. В. Линия лития в спектрах поздних M-карликов. Случай UX Tau C // Астрон. журн.—2000.—77, № 4.—С. 254—263.
7. Унзольд А. Физика звездных атмосфер. — М.: Гос. изд-во иностр. лит., 1949.—632 с.

8. Яковина Л. А., Павленко Я. В. Полосы молекулы NH в ультрафиолетовой области спектра как индикаторы содержания азота в атмосферах холодных звезд // Кинематика и физика небес. тел.—1998.—14, № 3.—С. 257—267.
9. Anders E., Grevesse N. Abundances of the elements: Meteoritic and solar // Geochim. et cosmochim. acta.—1989.—53.—P. 197—214.
10. Arribas S., Martinez Roger C. An empirical colour — T_{ef} calibration for G and K dwarf and subdwarf stars // Astron. and Astrophys.—1989.—215, N 2.—P. 305—315.
11. Cochran, W. D., Hatzes A. P., Butler R. P., Marcy G. W. The discovery of a planetary companion to 16 Cygni B // Astrophys. J.—1997.—483, N 2.—P. 457—463.
12. King J. R., Deliyannis C. P., Hiltgen D. D., et al. Lithium abundances in the Solar twins 16 Cyg A and B and the Solar analog alpha Cen A, Calibration of the 6707 AA Li region linelist, and implications // Astron. J.—1997.—113, N 5.—P. 1871—1883.
13. Kupka F. G., Ryabchikova T. A., Piskunov N. E., et al. VALD-2 — The new Vienna Atomic Line Database // Baltic Astronomy.—2000.—9, N 4.—P. 590—594.
14. Kurucz R. L. Computation of opacities of diatomic molecules // Molecules in the Stellar Environment / IAU Colloq., N 146. Copenhagen: Springer Verlag, 1994.—P. 282—295.
15. Kurucz R. L., Furenlid I., Brault J., Testerman L. Solar flux atlas from 296 to 1300 nm // Cambridge: Harvard Univ., 1984.—National Solar Obs. Atlas. No. 1.
16. Pavlenko Ya., Magazzu A. Theoretical LTE and non-LTE curves of growth for LiI lines in G-M dwarfs and subgiants // Astron. and Astrophys.—1996.—311, N 3.—P. 961—967.
17. Pavlenko Ya. V., Rebolo R., Martin E. L., Garcia Lopez R. J. Formation of lithium lines in very cool dwarfs // Astron. and Astrophys.—1995.—303, N 3.—P. 807—818.
18. Perryman M. A. C., Lindegren L., Kovalevsky J., et al. The Hipparcos Catalogue // Astron. and Astrophys.—1997.—323, N 1.—P. 49—52.

Поступила в редакцию 15.11.01