

УДК 524.31

В. В. Ковтюх<sup>1</sup>, К. Соубиран<sup>2</sup>, А. В. Бондарь<sup>3</sup>,  
С. А. Коротин<sup>1</sup>, Ф. А. Мусаев<sup>3</sup>, М. П. Ясинская<sup>1</sup>

<sup>1</sup>НИИ «Астрономическая обсерватория» Одесского национального университета  
65014 Одесса, парк Шевченко

<sup>2</sup>Обсерватория Бордо  
BP21, F-33270 Флуарак, Франция

<sup>3</sup>Международный центр астрономических и медико-экологических исследований  
361609 Россия, Кабардино-Балкарская Республика, Эльбрусский р-н, п. Терскол

## Содержание лития в F-, G-сверхгигантах и его возможная связь с вращением

*Из анализа химического состава большого числа сверхгигантов I и II классов светимости выделено пять массивных звезд, впервые эволюционирующих от В-звезд Главной последовательности в область красных сверхгигантов. У двух из них (HD 17905, HD 172365) наблюдается изначальный химический состав Li, C, N и Na, практически не измененный в процессах перемешивания и конвективного выноса продуктов CNO- и NeNa-циклов, в отличие от большинства сверхгигантов. Другие три находятся в процессе такого выноса (HD 18391, HD 32655, HD 159181). Три сверхгиганта показывают наличие линии лития, их линии поглощения уширены вращением. Два из этих литиевых сверхгигантов — HD 17905 и HD 18391 — обнаружены нами впервые. Детально обсуждается эволюционный статус всех пяти сверхгигантов. Сделан вывод, что перемешивание начинается при температурах 5800—6500 К, т. е. задолго до стадии красного гиганта. Сначала сгорает литий, параллельно с этим изменяются содержания C, N и Na. Найдено, что в быстровращающихся звездах разрушение лития незначительно — возможно потому, что вызванная вращением циркуляция около поверхности достаточно сильна для удержания лития в верхних слоях конвективной зоны, где температура недостаточно высока для его уничтожения.*

*ВМІСТ ЛІТІЮ У F-, G-НАДГІГАНТАХ ТА ЙОГО МОЖЛИВИЙ ЗВ'ЯЗОК З ОБЕРТАННЯМ, Ковтюх В. В., Соубіран К., Бондар А. В., Коротін С. А., Мусаєв Ф. А., Ясинська М. П. — З аналізу хімічного складу великої кількості надгігантів I і II класів світності виділено п'ять масивних зірок, що вперше еволюціонують від В-зірок Головної послідовності в область червоних надгігантів. Два з цих надгігантів (HD 17905, HD 172365) показують початковий хімічний вміст Li, C, N та Na, практично ще не змінений у процесі перемішування і конвектив-*

ного виносу продуктів CNO- та NeNa-циклів, на відміну від більшої частини надгігантів, для яких є характерними аномалії вмісту цих елементів. Інші три перебувають у процесі такого виносу (HD 18391, HD 32655, HD 159181). Три надгіганти показують наявність лінії літію, їхні лінії поглинання розширені обертанням. Два з них — HD 17905 та HD 18391 — знайдені нами вперше у цій роботі. Детально дискутується еволюційний статус усіх п'яти надгігантів. Зроблено висновок, що перемішування починається при температурах 5800—6500 К, тобто задовго до стадії червоного гіганта. Спочатку згорає літій, паралельно з цим відбуваються зміни вмісту C, N та Na. Знайдено, що у швидкообертючих зірках руйнування літію незначне — можливо, через те, що викликана обертанням циркуляція біля поверхні є достатньо сильною для збереження літію у верхніх шарах конвективної зони, де температура недостатня для його руйнування.

*ON THE LITHIUM ABUNDANCE IN F-, G-SUPERGIANTS AND ITS POSSIBLE CORRELATION WITH ROTATION, by Kovtyukh V. V., Soubiran C., Bondar A.V., Korotin S. A., Musaev F. A., Yasinskaya M. P. — From the abundance study of a great quantity of luminosity type I and II supergiants we identified five first-crossing objects, which are rare massive stars evolving from their progenitors, main-sequence B stars, to red supergiants for the first time. Two of these first-crossing supergiants (HD 17905 and HD 172365) show abundances of Li, C, N, O, and Na that are completely unaltered by a mixing process of any kind, including the convective dredge up responsible for the CNO and NeNa anomalies observed for most of supergiants. The other three are in the process of such a dredge up (HD 18391, HD 32655, HD 159181). Three supergiants show the availability of lithium line and have strongly rotationally-broadened absorption lines. Two of these Li-rich supergiants — HD 17905 and HD 18391 — are reported for the first time in this study. The evolutionary status of all the five supergiants is discussed in detail and the conclusion is made that the mixing begins at effective temperatures of about 5800—6500 K, i.e., long before the red giant stage. Lithium is being destroyed first, followed by a gradual change in C, N, and Na abundances. We found however that in very fast rotators the destruction of lithium is inhibited, possibly, because the rotation-induced current circulation near the surface is sufficiently strong in this case to prevent lithium from reaching the top of convective zone and therefore from being dragged to deeper layers where temperature is sufficiently high for its destruction.*

## ВВЕДЕНИЕ

Сверхгиганты спектральных классов F, G являются потомками звезд Главной последовательности (ГП) классов В2—В8. После ухода с ГП звезда всего за несколько тысяч лет пересекает диаграмму Герцшпрунга — Рассела (Г-Р) и становится красным (сверх)гигантом. Согласно стандартному сценарию загорание гелия в звездном ядре на стадии красного сверхгиганта (гиганта) приводит к развитию мощной конвективной оболочки, охватывающей почти весь объем звезды. При этом продукты термоядерных реакций выносятся на поверхность, изменяется содержание C, N, O и Na, а литий полностью сгорает при попадании в глубокие слои с высокой температурой [4].

Доля сверхгигантов, которые впервые пересекают диаграмму Г-Р, вероятно, не превышает нескольких процентов от общего числа сверхгигантов [28, 36]. Они должны обладать нетипичным для большинства сверхгигантов химическим составом, в частности показывать наличие лития и не показывать аномалий содержания C, N, O и Na.

Наблюдения [24, 26] подтверждают теоретически ожидаемое низкое значение содержания лития в атмосферах большинства сверхгигантов. Аномалии содержания CNO-элементов (из-за протекания неполного CNO-цикла) были открыты в работе [29]. Натрий производится в слоевом источнике горения водорода в реакциях NeNa-цикла, а затем тоже выносятся в атмосферу в результате крупномасштабной конвекции. Наблюдательные работы подтверждают этот сценарий [1, 3, 4, 34].

#### НАБЛЮДАТЕЛЬНЫЙ МАТЕРИАЛ

Для поиска сверхгигантов, впервые пересекающих диаграмму Г-Р, использовались спектры из обширной базы данных Обсерватории Верхнего Прованса (ОНР, Франция). Они были получены на 1.93-м телескопе, оснащённом эшелле-спектрометром ELODIE [16]. Разрешающая способность спектрометра 42000, участок длин волн — 440.0—680.0 нм, отношение сигнала к шуму — 130—230. Однако ограниченный спектральный диапазон не позволяет исследовать линии некоторых важных элементов (в частности азота).

Дополнительный спектральный материал был получен на 2-м телескопе системы Ричи—Кретьена (Цейс-2000) обсерватории на пике Терскол (Россия), оснащённом эшелле-спектрометром в фокусе кудэ [6]. Разрешающая способность спектрометра 45000, участок длин волн 349.5—1000.0 нм, отношение сигнала к шуму — больше 100. Обработка спектров (проведение уровня непрерывного спектра, измерение эквивалентных ширин линий  $W_\lambda$  и пр.) была выполнена нами при помощи пакета программ DECH20 [2].

На рис. 1 мы приводим участки спектра в области линии лития Li I  $\lambda$  670.78 нм для трех исследованных литиевых сверхгигантов, два из которых — HD 17905 и HD 18391 — открыты нами.

#### ПАРАМЕТРЫ АТМОСФЕР

Основные характеристики исследуемых звезд приведены в табл. 1. Спектральные классы  $S_p$ , звездные величины  $V$  и другие параметры взяты из базы данных SIMBAD.

Значения эффективных температур  $T_{\text{эф}}$  определялись с использованием нового и очень точного метода, предложенного в работе [20]. Этот спектроскопический метод основан на использовании отношений глубин избранных пар спектральных линий, наиболее чувствительных к температуре. Благо-

Рис. 1. Линия лития в спектрах трех исследованных сверхгигантов. Аномальные профили линий могут свидетельствовать о наличии слабых нерадиальных пульсаций

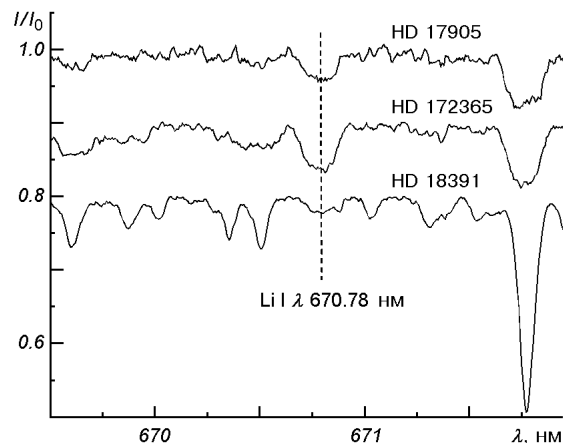


Таблица 1. Основные характеристики исследуемых звезд

HD	Sp	V	B - V	vsini, км/с	MV	T <sub>эф'</sub> К	lgg	V <sub>t'</sub> км/с	[Fe/H]	(Li/H)
17905	F5	6.56	0.479	75	-0.02	6407	2.3	4.1	-0.14	3.15
18391	G0Ia	6.9v	1.88	21	-6.60	5775	1.2	12.0	0.02	0.89
32655	F2IIp:	6.20	0.400	28	-0.89	6617	2.5	4.0	-0.17	—
159181	G2Ib-IIa	2.79	0.94	8	-2.46	5192	2.2	3.4	0.04	—
172365	F8II	6.36	0.735	67.3	-1.28	6030	2.5	7.5	-0.07	3.12

даря большому числу калибровок этот метод обеспечивает внутреннюю точность определения  $T_{эф}$  порядка 10—30 К.

Величина микротурбулентной скорости  $V_t$  определена из условия независимости содержания ионизированного железа Fe II, определяемого по набору линий, от их эквивалентных ширин [19]. Это вызвано тем, что линии Fe I сильно подвержены неЛТР-эффектам [31, 32]. В то же время линии Fe II практически свободны от этого недостатка [38].

Ускорение свободного падения  $lgg$  определено из условия ионизационного равновесия для атомов Fe I и Fe II. При определении микротурбулентной скорости  $V_t$  по линиям Fe II содержание Fe I из-за влияния неЛТР-эффектов становится сильно зависимым от эквивалентной ширины  $W_\lambda$ . 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  $W_\lambda = 0$  [19].

Такой модифицированный подход позволяет в значительной степени нивелировать неЛТР-эффекты для железа и дает возможность более точно определять параметры атмосфер и химический состав [19]. Мы использовали солнечные силы осцилляторов [19], определенные на основе атласа солнечного спектра [23], солнечного химического состава, уточненного Гревессом и др. [14], и модели солнечной атмосферы из сетки моделей Куруча [21].

Параметры атмосфер приведены в табл. 1. Точность определения параметров равна: для эффективных температур  $\Delta T_{эф} = \pm 30$  К, для ускорений свободного падения  $\Delta lgg = \pm 0.15$  dex, для микротурбулентной скорости  $\Delta V_t = \pm 0.2$  км/с.

#### ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ

Химический состав исследуемых звезд определен с использованием сетки моделей Куруца [21]. Содержание большинства элементов, включая железо, определено в ЛТР-приближении по программе Куруца WIDTH9. В табл. 2 приведены полученные значения содержаний элементов относительно Солнца, а также указано минимальное и максимальное количество использованных в анализе линий данного элемента  $N$ . Содержание лития относительно водорода (в шкале  $lgN(H) = 12.0$ ) дано в табл. 1.

Содержание элементов C, N, O, Na, Mg и K мы исследовали с учетом возможных отклонений от ЛТР. Для этого применялся несколько модифицированный нами программный комплекс MULTI [9]. Чтобы более корректно (по сравнению с исходным вариантом программы) рассчитывать непрозрачности в континууме, нами был добавлен блок значений непрозрачностей из программного комплекса ATLAS9 [22]. Возможность учета поглощения большим числом линий, особенно в области близкого ультрафиолета,

Таблица 2. Химический состав сверхгигантов

Элемент	HD17905	HD18391	HD32655	HD159181	HD172365	N
C I	-0.02	-0.07	-0.12	0.03	0.38	5—15
N I	0.11	0.41	0.20	0.21	0.22	2—5
O I	0.00	-0.10	0.15	0.20	-0.20	4—6
Na I	0.00	0.15	-0.18	-0.07	0.00	4—6
Mg I	0.12	-0.23	-0.53	-0.03	-0.75	1—6
Al I		0.11	0.10	-0.03	0.37	1—6
Si I	0.07	0.07	-0.03	-0.03	-0.02	4—30
S I	0.16	0.02	0.01	0.23	0.24	3—5
K I	0.17		-0.13	-0.53	-0.33	1—1
Ca I	0.07	-0.10	-0.17	-0.26	-0.12	2—7
Sc II	-0.15		-0.25	-0.08	-0.21	1—5
Ti I		0.10	-0.03	-0.11	-0.09	2—20
Ti II	0.02	0.03	-0.26	0.05		1—4
V I		0.15	0.09	-0.15	0.17	1—17
V II		0.00	-0.12	-0.13		1—3
Cr I	0.12	-0.01	-0.19	-0.09	0.20	1—11
Cr II	-0.24	0.08	-0.24	0.08	-0.23	1—8
Mn I	0.01	-0.02	-0.11	0.00	0.14	2—4
Fe I	-0.14	0.02	-0.16	0.04	-0.07	23—132
Fe II	-0.12	0.03	-0.19	0.06	-0.07	7—19
Co I		-0.33		-0.19		1—20
Ni I	0.03	0.01	-0.08	-0.07	0.01	10—56
Y II	-0.15	0.35	-0.16	0.24	0.14	1—8
Ce II		0.18	0.03	-0.06		1—5
Nd II		0.36	-0.12	-0.04		2—7
Eu II		0.39	-0.16	0.06	0.15	1—2

позволила гораздо точнее описать распределение интенсивности, что кардинальным образом сказывается на радиативных скоростях  $b-f$ -переходов.

Используемые многоуровневые модели атомов углерода, кислорода, натрия и магния описаны в работах [5, 17, 18, 33].

Модель атома азота включает в себя 35 уровней N I, 5 уровней N II и основной уровень N III, между которыми учитывается 141 связанно-связанный переход и 232 перехода с фиксированными радиативными скоростями. Кроме этого, учитывались 66 уровней N I, 38 уровней N II и 4 уровня N III с населенностями в состоянии ЛТР. Модель атома калия включает в себя 20 уровней K I и основной уровень K II, между которыми детально учитываются 62 связанно-связанных перехода. Сечения фотоионизации были взяты из TOPBASE [11], ударные скорости для связанно-связанных переходов рассчитывались по формуле Регемортера [39], а для связанно-свободных — по формуле Ситона [37].

Применение неЛТР-подхода совершенно необходимо для линий всех указанных элементов. Особенно это касается N, O, Na и K, для которых где классические методы могут приводить к ошибке в 0.2-0.3 dex и к тому же не дают возможности использовать в анализе сильные линии, такие как D-линия натрия или ИК-триплет кислорода. В табл. 2 приведены содержания C, N, O, Na, Mg и K, полученные с учетом неЛТР-эффектов.

#### ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Прежде всего необходимо отметить, что нами было исследовано около 50 сверхгигантов с целью поиска звезд, впервые пересекающих диаграмму Г-Р. В отличие от классических цефеид, для которых светимости надежно определяются по зависимости период — светимость, для сверхгигантов нет надежных методов определения светимостей. Поэтому вместо светимости

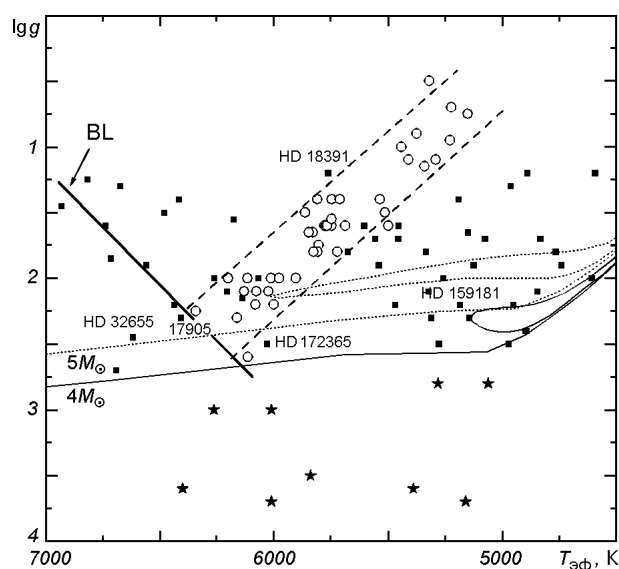


Рис. 2. Диаграмма «эффективная температура — ускорение свободного падения». Показано положение полосы нестабильности и классических цефеид в ней (кружки). Сверхгиганты отмечены квадратами, гиганты — звездочками. Слева показано наблюдаемое положение границ голубых петель (BL) для эволюционных треков. Также показаны эволюционные треки для звезд с массами 4 и 5 солнечных [35]

для построения аналога диаграммы Г-Р мы использовали ее аналог — ускорение свободного падения  $lgg$ . Этот параметр определяется достаточно надежно, со средней ошибкой порядка 0.15 dex. На рис. 2 мы приводим такую диаграмму по нашим данным. Для классических цефеид использованы значения  $lgg$  для стационарных фаз, в которых пульсационные движения не вносят дополнительную динамическую составляющую в  $lgg$  (см. [27] и ссылки в ней). Показаны теоретические эволюционные треки для двух моделей с массами 4 и 5 солнечных и с металличностью  $z = 0.02$  [35].

Анализ этой диаграммы (рис. 2) позволяет сделать вывод о том, что глубокий конвективный вынос (первый dredge-up) начинается задолго до стадии красного гиганта, при температурах порядка 5800 К (HD 18391 находится именно в процессе такого выноса — у нее частично разрушен литий и частично изменено содержание CNO-элементов) или даже раньше — при температуре свыше 6000 К (у HD 32655 литий сгорел, но конвекция не достигла глубоких слоев с продуктами переработки CNO-элементов, поэтому их содержание не изменилось).

Надо отметить, что эволюционные треки [35] для малых масс не достигают наблюдаемой границы голубых петель, это свидетельствует о существенных недостатках стандартных эволюционных моделей (смотри дискуссию и ссылки в [10]). В чем причина такого расхождения? Как мы показали выше, эффективный конвективный вынос начинается задолго до стадии гиганта, что пока не учитывается корректно в эволюционных моделях. Другой возможной причиной является недоучет влияния вращения и меридиональной циркуляции на эволюцию сверхгиганта. Отметим также, что согласно результатам [12] конвекция у гигантов начинается уже при температуре около 5600 К, после резкого уменьшения параметра  $v \sin i$  вследствие расширения звезды.

#### АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Основным индикатором эволюции звезды и степени перемешивания вещества на стадии до гелиевой вспышки являются, помимо лития, прежде всего содержания элементов C и N, претерпевающие изменения в процессе неполного CNO-цикла горения водорода. Возможно также горение водорода в NeNa-, MgAl-циклах, что приводит к увеличению содержания Na, Al.

Элементы C, N, O. Средние значения содержаний этих элементов, полученные для исследуемых звезд в приближении неЛТР до стадии красного гиганта, следующие:  $\langle [C/Fe] \rangle = 0.10 \pm 0.09$  (или  $0.01 \pm 0.04$ , если исключить HD 172365);  $\langle [N/Fe] \rangle = 0.29 \pm 0.04$ ;  $\langle [O/Fe] \rangle = 0.07 \pm 0.17$ . После стадии гиганта:  $\langle [C/Fe] \rangle = -0.27 \pm 0.04$ ;  $\langle [N/Fe] \rangle = 0.53 \pm 0.03$ ;  $\langle [O/Fe] \rangle = 0.03 \pm 0.06$ . Эволюционные изменения C и N хорошо согласуются с предсказаниями теории эволюции и с результатами других авторов [13, 29, 36].

Элементы Na, Mg, Al. Содержание Na до стадии гиганта равно  $\langle [Na/Fe] \rangle = 0.04 \pm 0.05$ ; после —  $0.23 \pm 0.04$ . Сходное значение избытка было предсказано в [13]. Содержание Mg и Al не показывает эволюционных изменений, не показывают их и более тяжелые элементы. Итак, можно сделать вывод, что эволюционные изменения C, N, O и Na хорошо согласуются с эволюционными расчетами.

Что же касается лития, то тут ситуация сложнее. Конечно, для окончательных выводов найдено пока недостаточно объектов. Но можно отметить, что сверхгиганты с быстрым вращением показывают высокое содержание лития (HD 17905, HD 172365 — наши данные, для HD 174104 — [30]), а у более медленных литий уже сгорел до практически ненаблюдаемого значения (HD 18391, HD 32655, HD 159181). Также есть тенденция уменьшения содержания лития с приближением к стадии гиганта, что естественно объясняется соответствующим углублением конвективной оболочки.

Связь между скоростью вращения и содержанием лития давно найдена для звезд ГП [15] и для гигантов [8, 12]. В работе [15] это объясняется тем, что при быстром вращении меридиональная циркуляция перемешивает вещество только в верхних слоях, где температура недостаточна для разрушения лития. Иными словами, быстрое вращение способствует консервации лития. Мы предполагаем, что подобный механизм может быть эффективным и для сверхгигантов.

1. Боярчук А. А., Губены И., Кубат И. и др. Эффекты отклонений от ЛТР в атмосферах F-сверхгигантов. Анализ линий Na I (метод вычислений) // *Астрофизика*.—1988.—28, № 2.—С. 335—342.
2. Галазутдинов Г. А. Система обработки звездных эшеле-спектров. — Нижний Архыз, 1992.—52 с.—(Препринт / Российская АН. Спец. астрофиз. обсерватория; № 92).
3. Денисенков П. А., Иванов В. В. Синтез натрия при горении водорода в звездах // *Письма в Астрон. журн.*—1987.—13, № 5.—С. 520—525.
4. Любимков Л. С. Химический состав звезд: метод и результаты анализа. — Одесса: Астропринт, 1995.—323 с.
5. Машонкина Л., Сахибуллин Н., Шиманский В. Спектральные линии Na I в атмосферах G-карликов в отсутствие ЛТР // *Астрон. журн.*—1993.—70, № 3.—С. 372—378.
6. Мусаев Ф. А., Галазутдинов Г. А., Сергеев А. В. и др. Кудэ-эшеле-спектрометр для 2-м телескопа на пике Терскол // *Кинематика и физика небес. тел.*—1999.—15, № 3.—С. 282—287.
7. Andrievsky S. M., Gorlova N. I., Kovtyukh V. V., et al. The lithium-rich supergiant HD 172365 // *Astron. Nachr.*—1999.—320, N 1.—P. 35—41.
8. Bohm-Vitense E. Rotation and lithium surface abundances, revisited // *Astron. J.*—2004.—128, N 11.—P. 2435—2442.
9. Carlsson M. A computer program for solving multi-level non-LTE radiative transfer problems in moving or static atmospheres // *Uppsala Obs. Rep.*—1986.—33.—P. 2—17.
10. Cordier D., Goupil M. J., Lebreton Y. The faint Cepheids of the Small Magellanic Cloud: an evolutionary selection effect? // *Astron. and Astrophys.*—2003.—409, N 2.—P. 491—501.
11. Cunto W., Mendoza C. The OPACITY project — the TOPBASE atomic database // *Rev. mex. astron. y astrofis.*—1992.—23.—P. 107—153.
12. De Laverny P., Do Nascimento J. D., Lebre A., De Medeiros J. R. Observational constraints for lithium depletion before the RGB // *Astron. and Astrophys.*—2003.—410, N 3.—P. 937—942.

13. *El Eid M. F., Champagne A. E.* Sodium enrichment in A-F type supergiants // *Astrophys. J.*—1995.—**451**, N 1.—P. 298—307.
14. *Grevesse N., Noels A., Sauval A. J.* Standard Abundances // *Conf. College Park.*—1996.—**99**.—P. 117—120.
15. *Jones B. F., Shetrone M., Fischer D., Soderblom D. R.* The evolution of the lithium abundances of solar-type stars. VI. The end of lithium in the Pleiades // *Astron. J.*—1996.—**112**, N 1.—P. 186—191.
16. *Katz D., Soubiran C., Cayrel R., et al.* On-line determination of stellar atmospheric parameters  $T_{\text{eff}}$ ,  $\log g$ , [Fe/H] from ELODIE echelle spectra. I. The method // *Astron. and Astrophys.*—1998.—**338**, N 1.—P. 151—160.
17. *Korotin S. A., Andrievsky S. M., Kostynchuk L. Yu.* Carbon abundance in early B-stars. I. NLTE calculations for GAMMA Peg // *Astrophys. and Space Sci.*—1999.—**260**, N 4.—P. 531—539.
18. *Korotin S. A., Andrievsky S. M., Luck R. E.* Oxygen abundances in early B-stars // *Astron. and Astrophys.*—1999.—**351**, N 1.—P. 168—176.
19. *Kovtyukh V. V., Andrievsky S. M.* Do we really obtain reliable elemental abundances for supergiant stars? // *Astron. and Astrophys.*—1999.—**351**, N 2.—P. 597—606.
20. *Kovtyukh V. V., Gorlova N. I.* Precise temperatures of classical Cepheids and yellow supergiants from line-depth ratios // *Astron. and Astrophys.*—2000.—**358**, N 2.—P. 587—592.
21. *Kurucz R. L.* Model atmospheres for population synthesis // *The stellar populations of galaxies* // *Symp. N 149.* — Dordrecht: Kluwer, 1992.—P. 225.
22. *Kurucz, R. L.* ATLAS 9 stellar atmosphere program and 2 km<sup>-1</sup> grid. — 1993.—CD-ROM 13.
23. *Kurucz R. L., Furenlid I., Brault J., Testerman L.* The solar flux atlas from 299 nm to 1300 nm. — Nat. Sol. Obs. USA, 1984.
24. *Luck R. E.* The chemical composition of late-type supergiants. II. Lithium abundances for 19 G and K Ib stars // *Astrophys. J.*—1977.—**218**, N 2.—P. 752—766.
25. *Luck R. E.* Two lithium-rich supergiants // *Publ. Astron. Soc. Pacif.*—1982—**94**, N 572.—P. 811—823.
26. *Luck R. E.* Open cluster chemical composition. 1. Later type stars in eight clusters // *Astrophys. J. Suppl. Ser.*—1994.—**91**, N 2.—P. 309—346.
27. *Luck R. E., Gieren W., Andrievsky S. M., et al.* The galactic abundance gradient from Cepheids. IV. New results for the outer disc // *Astron. and Astrophys.*—2003.—**401**, N 3.—P. 939—957.
28. *Luck R. E., Kovtyukh V. V., Andrievsky S. M.* SV Vulpeculae: a first crossing Cepheid? // *Astron. and Astrophys.*—2001.—**373**, N 2.—P. 589—596.
29. *Luck R. E., Lambert D. L.* The abundances of carbon, nitrogen, and oxygen in the atmospheres of cepheid variables: evidence for helium enrichment // *Astrophys. J.*—1981.—**245**, N 2.—P. 1018—1034.
30. *Luck R. E., Sneden C.* Carbon, nitrogen, and oxygen in two lithium-rich supergiants // *Publ. Astron. Soc. Pacif.*—1986.—**98**, N 601.—P. 310—318.
31. *Lyubimkov L. S., Boyarchuk A. A.* Influence of deviations from LTE on the determination of microturbulence in the atmospheres of F-type supergiants // *Astrophysics.*—1984.—**19**, N 3.—P. 385—390.
32. *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**, N 2.—P. 203—210.
33. *Mishenina T. V., Soubiran C., Kovtyukh V. V., Korotin S. A.* On the correlation of elemental abundances with kinematics among galactic disk stars // *Astron. and Astrophys.*—2004.—**418**, N 2.—P. 551—562.
34. *Mowlavi N.* Sodium production in asymptotic giant branch stars // *Astron. and Astrophys.*—1999.—**350**, N 1.—P. 73—88.
35. *Pols O. R., Schroder K. P., Hurley J. R., et al.* Stellar evolution models for  $Z = 0.0001$  to  $0.03$  // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—1998.—**298**, N 2.—P. 525—536.
36. *Schaller G., Schaerer D., Meynet G., Maeder A.* New grids of stellar models from 0.8 to 120 solar masses at  $Z = 0.020$  and  $Z = 0.001$  // *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.*—1992.—**96**, N 1.—P. 269—331.
37. *Seaton M. J.* Rate of collisional excitation in stellar atmospheres // *Proc. Phys. Soc.*—1962.—**79**.—P. 1105—1115.
38. *Thevenin F., Idiart T. P.* Stellar Iron Abundances: Non-LTE Effects // *Astrophys. J.*—1999.—**521**, N 2.—P. 753—763.
39. *Van Regemorter H.* Rate of collisional excitation in stellar atmospheres // *Astrophys. J.*—1962.—**136**, N 3.—P. 906—912.

Поступила в редакцию 13.01.05