

ПРОБЛЕМА ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ЦЕФЕИД I-ГО ТИПА НАСЕЛЕНИЯ

В. Г. Клочкова

Методом моделей атмосфер исследован химический состав 17 классических цефеид. Показано, что обнаруженные аномальные распространности химических элементов имеют методическое происхождение, т.е. отражают несовершенство современного уровня теоретического анализа спектров пульсирующих сверхгигантов с применением однородных моделей атмосфер в приближении гидростатического и локального термодинамического равновесия.

The chemical composition of the 17 classical cepheids is investigated by the model atmosphere method. It is shown that the found peculiarities of the chemical abundance pattern have methodical origin, i.e. reflect the imperfection of the current level of the theoretical analysis of the pulsating supergiants spectra while the homogeneous atmosphere models with hydrostatic and local thermodynamic equilibrium approach are used.

Изучение распространности химических элементов в атмосферах классических цефеид позволяет определить химический состав наиболее молодого населения диска Галактики. Наблюдение цефеид в широком интервале галактоцентрических расстояний дает возможность оценить радиальный градиент химического состава; эти оценки интересно сочетать с оценками, которые в дальнейшем необходимо выполнить по наиболее старым объектам диска. Важно определять радиальные градиенты в диске по разным элементам, синтезируемым в звездах разной массы, обогащающих межзвездную среду на разной временной шкале. Цефеиды диска уже прошли стадию, по крайней мере, первого dredge-up, следовательно, возможны изменения наблюдаемого химического состава по сравнению с исходным, возникающие за счет выноса на поверхность элементов, синтезированных на предыдущих эволюционных стадиях. Принято считать, например, что наблюдаемые у цефеид особенности содержания углерода, кислорода и азота по сравнению с солнечным химическим составом (Лак, Ламберт, 1981) есть результат выноса на стадии красного гиганта продуктов горения водорода.

Ранее (Клочкова, Панчук, 1991) мы опубликовали детали методического подхода и результаты определения содержания $\lg \varepsilon(X)$ элементов железного пика в атмосферах 17 цефеид. Наблюдения были выполнены нами на Основном звездном спектрографе БТА в спектральном интервале $\lambda\lambda$ 5000-6800Å с обратной линейной дисперсией $D=14$ Å/мм. Ниже приведены результаты изучения кривой распространности химических элементов, доступных исследованию в использованном наблюдательном варианте.

В своем исследовании химического состава цефеид мы ограничились теми элементами, для которых в наших спектрах уверенно измеряются малоблендированные линии с эквивалентными ширинами $W < 250$ мА. Учет более сильных линий вносит дополнительную неопределенность в $\lg \varepsilon(X)$, главным образом, из-за отклонений от условий ЛТР (Спит и др., 1989). В табл. 1 дан список исследованных цефеид и их усредненный по фазам блеска химический состав относительно F-карликов диска $[X/Fe]_{FV}$. Химический состав, полученный для данной звезды на разных фазах блеска, усреднялся с равными весами. В табл. 2 приведен средний химический состав для выборки F-карликов из рассеянных скоплений (Клочкова, Панчук, 1988а), которые мы использовали для сопоставления с цефеидами.

Таблица 1. Индивидуальные значения распространенности $[X/Fe]_{FV}$ для цефеид относительно F-карликов диска. Приведены также средние распространенности относительно F-карликов и F-сверхгиганта α Per.

Звезда	$[X/Fe]_{FV}$								
	OI	NaI	MgI	SiI	SiIII	CaI	ScII	TiI	TiII
FM Aql	+0.13	+2.20	-0.17	+0.19	-	+0.09	-0.28	+0.12	-0.22
RT Aur	-0.26	+0.42	+0.09	+0.18	+0.06	+0.40	-0.12	-0.21	+0.05
RX Cam	+0.24	+0.40	+0.12	+0.20	+0.18	+0.07	-0.13	-0.03	-0.48
SU Cas	+0.35	+0.39	+0.27	+0.10	+0.62	+0.36	-0.14	-0.04	+0.02
δ Cep	+0.29	+0.33	+0.15	+0.17	+0.50	+0.33	-0.18	+0.01	-0.08
X Cyg	+0.11	+0.33	+0.19	+0.12	-0.25	+0.18	+0.11	-0.15	-0.02
SU Cyg	+0.06	+0.47	+0.20	+0.08	+0.31	+0.28	-0.15	-0.23	.00
W Gem	-0.35	+0.43	+0.26	+0.09	+0.19	+0.20	-0.15	-0.15	-0.05
ζ Gem	-0.06	+0.46	+0.30	+0.06	+0.25	+0.16	-0.21	-0.16	-0.05
X Lac	+0.02	+0.42	+0.18	+0.23	+0.20	+0.33	-0.14	-0.10	+0.18
T Mon	-0.27	+0.44	+0.40	+0.09	+0.26	+0.24	-0.10	-0.25	+0.13
AW Per	+0.43	+0.44	+0.56	+0.14	+0.34	+0.12	-0.32	.00	-0.23
S Sge	+0.32	+0.20	+0.17	-0.06	+0.04	+0.06	-0.13	-0.16	-0.11
SZ Tau	+0.27	+0.53	+0.23	+0.23	+0.41	+0.31	-0.21	-0.09	-0.01
EU Tau	+0.44	+0.29	+0.20	+0.01	+0.59	+0.25	-0.37	-0.11	+0.26
SV Vul	+0.63	+0.12	+0.03	+0.11	+0.06	+0.13	+0.18	-0.07	+0.06
U Vul	-0.61	+0.33	-	+0.07	-0.03	+0.10	-0.43	-0.16	-0.03
$[X/Fe]_{FV}$									
Среднее	+0.10	+0.36	+0.20	+0.12	+0.23	+0.21	-0.16	-0.10	-0.03
$\pm \sigma$	0.08	0.03	0.04	0.02	0.06	0.03	0.04	0.02	0.04
$[X/Fe]_{\alpha \text{ Per}}$									
Среднее	-0.31	+0.11	+0.12	-0.03	-	.00	.00	-0.19	-0.37

Распространенность химических элементов в атмосферах цефеид была изучена прежде всего относительно F-карликов диска, т.е. относительно непрозволюционировавших звезд с химическим составом, совпадающим с дозвездным в молодом диске. В

табл. 1 приведены и усредненные относительные величины для выборки цефеид $[X/Fe]_{FV}$. Статистическая обработка данных для этих двух типов звезд выявила наличие слабого, но статистически значимого избытка легких элементов: Na, Mg, Si, Ca и существенного дефицита европия.

Таблица 1 (окончание)

Звезда	$[X/Fe]_{FV}$								
	CrI	CrII	MnI	FeI	FeII	NiI	YII	BaII	EuII
FM Aql	+0.00	-.45	+0.05	.00	+0.01	+0.03	-.27	-.04	-0.71
RT Aur	+0.19	-.38	-.08	.00	+0.02	-.01	+0.41	+0.40	-0.97
RX Cam	+0.02	-.43	-.14	.00	+0.03	-.03	-.49	+0.39	-0.58
SU Cas	+0.08	-.33	-.04	.00	-.02	-.12	-.03	+0.51	-1.04
δ Cep	+0.08	-.43	-.13	.00	-.02	-.12	-.27	+0.28	-1.17
χ Cyg	+0.34	-.34	-.21	.00	+0.03	-.18	+0.35	-	-0.74
SU Cyg	+0.04	-.48	-.05	.00	.00	-.09	-.11	-.01	-0.93
W Gem	+0.20	-.35	-.13	.00	+0.01	+0.01	+0.52	+0.76	-1.08
ζ Gem	+0.09	-.50	-.12	.00	+0.05	-.14	+0.06	-	-0.92
χ Lac	+0.28	-.19	-.11	.00	-.02	+0.12	+0.38	+0.28	-0.93
T Mon	+0.13	-.30	-.05	.00	+0.01	-.10	+0.35	+0.47	-1.10
AW Per	-0.12	-.60	-.21	.00	+0.10	+0.02	-.12	-	-0.92
S Sge	+0.17	-.33	+0.03	.00	+0.02	-.19	+0.30	-	-0.82
SZ Tau	+0.13	-.25	-.09	.00	+0.02	-.08	+0.01	+0.29	-1.49
EU Tau	+0.19	-.55	-.08	.00	.00	.00	+0.12	-.17	-1.06
SV Vul	+0.35	-.29	.00	.00	+0.02	-.05	-	-	-0.78
U Vul	-0.16	-.51	-.23	.00	+0.04	-.09	-	-	-1.35
$[X/Fe]_{FV}$ Среднее	+0.12	-.39	-.09	.00	+0.02	-.06	+0.08	+0.29	-0.98
±σ	0.03	0.03	0.02	-	-	0.02	0.08	0.08	0.06
$[X/Fe]_{\alpha Per}$ Среднее	-0.14	-.09	-.14	-.00	-.00	-.06	+0.14	-.52	-.10

Существует ряд проблем теоретического описания спектров F-карликов. Не вдаваясь в подробности, отметим, что некоторое несоответствие теории и наблюдений представляется возможным снять только на более высоком уровне описания уширения линий турбуленцией (Дравиньш, 1989). Поэтому химический состав цефеид мы сравнили также со средним химическим составом F-сверхгиганта αPer из рассеянного скопления, изученного ранее (Клочкова, Панчук, 19886). Относительные распространности элементов для отдельных цефеид можно получить из табл. 1, учитывая различия между средними кривыми распространности элементов для F-карликов и αPer . Необходимость рассматривать химический состав далеко проэволюционировавших звезд высокой светимости относительно стандартных F-сверхгигантов отметили

Спит и др. (1989). Как и в прежних своих исследованиях химического состава выборок звезд различных типов, здесь мы также следуем принципу дифференциальной методики.

Таблица 2. Средний химический состав атмосфер F-карликов (Клочкова, Панчук, 1988а) и F-сверхгигантов (Клочкова, Панчук, 1988б, в) из рассеянных скоплений диска

	$-lg\epsilon(X)_{FV} \pm \sigma$	$-lg\epsilon(X)_{FI} \pm \sigma$	α Per		$-lg\epsilon(X)_{FV} \pm \sigma$	$-lg\epsilon(X)_{FI} \pm \sigma$	α Per				
OI *	3.16	-	2.79 \pm 0.12	2.83	CrI	6.49 \pm 0.11	6.32 \pm 0.12	6.30			
NaI	5.60 \pm 0.08	5.52	0.14	5.43	CrII	6.18	0.08	6.56	0.15	6.50	
MgI	4.74	0.12	4.93	0.19	4.74	MnI	6.61	0.07	6.66	0.11	6.64
SiI	4.50	0.04	4.51	0.15	4.44	FeI	4.52	0.09	4.69	0.15	4.60
SiII	4.46	0.07	-	-	-	FeII	4.52	0.09	4.47	0.16	4.50
CaI	5.78	0.08	5.86	0.19	5.65	NiI	5.41	0.08	5.51	0.14	5.48
ScII	8.79	0.06	9.03	0.10	8.95	YII	9.96	0.18	10.10	-	10.05
TiI	6.87	0.20	6.82	0.16	6.86	BaII	10.22	0.09	9.89	0.22	9.35
TiII	7.21	0.08	7.04	0.14	6.88	EuII	10.43	0.20	11.22	0.14	11.31

* Содержание кислорода из работы Росса и Аллера (1976).

Особенности анализа спектров цефеид методом моделей атмосфер

Было показано (Густафссон, 1983), что точность определения химического состава характеризуется еще и тем, на какой оптической глубине в среднем формируются используемые линии. Известно, что для каждого атома или иона глубина формирования линии связана с эквивалентной шириной (см., например, рис. 5 в работе Клочковой и др., 1985). Поэтому, принимая во внимание известную формальность понятия средней глубины образования линии, мы сравнили дифференциальные определения содержания данного элемента, выполненные по каждой из линий, с ее эквивалентной шириной (рис. 1а). Для линий Ca и Si в атмосферах цефеид обнаружены корреляции $[X]$ и W , нескомпенсированные при выборе ξ_t по эквивалентным ширинам линий Fe. Несмотря на то, что основные параметры атмосферы нормального непременного сверхгиганта α Per (Клочкова, Панчук, 1988б) близки к параметрам атмосфер цефеид, зависимости содержания элементов от W у α Per не найдены (рис. 1б). Поэтому естественно предположить, что зависимости $[X]-W$ связаны с динамикой пульсирующих атмосфер, не отражаемой моделями, вычисленными при условии гидростатического равновесия. Было показано, что градиент скоростей в атмосфере влияет на форму кривой роста примерно таким же образом, как и микротурбулентность (Леду и Уитни, 1964). Поэтому можно надеяться, что градиент скоростей учтен на этапе формализованного вычисления ξ_t по линиям Fe. Используемые при этом линии Fe формируются в том же интервале оптических глубин в континууме, что и линии Ca и

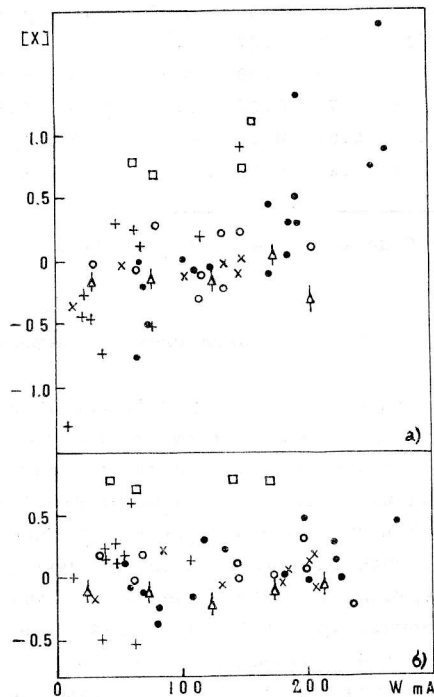
Si. Поэтому различие в поведении спектральных линий нормального сверхгиганта и цефеид позволяет в первом приближении задачи о химсоставе цефеид считать необязательным учет сферичности атмосфер. По-видимому, важен учет турбулентного давления P_t , которое может значительно изменить структуру атмосфер цефеид. Несмотря на это, мы ограничились бланкетированными моделями Куруча (1979) и не стали применять модели Парсонса (1969), так как считаем, что учет P_t в этих моделях существенно обесценивается упрощенной схемой учета поглощения в атомных линиях. Не удастся объяснить данные рис. 1а за счет неучтенного эффекта разнасыщения сильных линий градиентом скоростей, общим для всех элементов. Отсутствие зависимости $[X]$ от W для элементов, представленных в спектрах линиями ионов, может быть аргументом в пользу сверхионизации как физического эффекта, приемлемого для объяснения уклонений на кривой распространенности у цефеид. Контраргументом является отсутствие корреляций $[X]-W$ как для атомов, так и для ионов, наблюдаемых в спектрах F-сверхгигантов. Обнаруженный методический эффект невозможно исправить, используя микротурбулентную скорость, переменную с глубиной в атмосфере, так как необходимая величина коррекции микротурбулентной скорости с глубиной различается у разных атомов.

Рис. 1. Примеры зависимостей содержания данного элемента от эквивалентной ширины используемых линий, величины $[X]=\lg \varepsilon[X]-\lg \varepsilon(X)$ вычислены относительно солнечного химического состава (Росс, Аллер, 1976).

а) Цефеида SU Cas, параметры расчета: $T_e=5950$, $\lg g=1.6$, $\xi_t=3.0$;

б) Сверхгигант α Per, параметры расчета: $T_e=6500$, $\lg g=1.5$, $\xi_t=4.7$.

Обозначения: \square - Na, $+$ - Si, \bullet - Ca, \circ - Sc⁺, x - Fe⁺, Δ - средние по группам линий Fe.



Мы показали, что определения T_e цефеид из условия бoльцмановского равновесия атомов железа систематически отличаются от T_e , определяемых по профилям линии H_α с привлечением условия ионизационного равновесия для Fe, и принимаемых нами в качестве эффективных температур моделей (Клочкова, Панчук, 1991). Следовательно, зависимость, подобную зависимости для Ca и Si, можно ожидать и для атомов Fe, она должна появиться как отражение зависимости $\lg \varepsilon(\text{Fe})$ от χ_L , некомпенсированной при определении T_e . Однако искомая зависимость практически отсутствует, т.к.

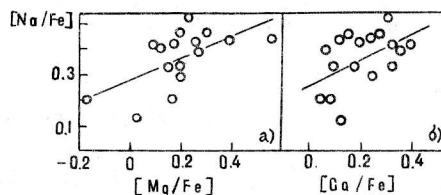
зависимость $\lg \epsilon(\text{Fe})$ от χ_L в значительной мере устраняется на этапе определения ξ_t . Если предположить, что атмосферы цефеид лучше описываются бoльцмановскими T_e , то возникают сложности в описании профилей N_α и, тем более, β -индекса (Клочкова, Панчук, 1991). Внутренняя точность определения химсостава при этом не возрастет (это становится ясным, если пересчитать, например, данные рис. 1а для модели с более высокой T_e).

Проблему можно частично обойти, вычисляя химический состав только по слабым линиям. Для определения содержания элементов, представленных только линиями на пологой части кривой роста, придется исследовать поведение зависимостей, аналогичных рис. 1а, наблюдая избранные цефеиды на различных фазах кривой изменения блеска.

Распространенность химических элементов в атмосферах цефеид

Анализ химического состава начнем с поиска взаимных корреляций между содержаниями различных элементов, результаты такого сравнения не зависят от того, на какой средний химический состав выполнена нормировка. Мы обнаружили взаимные корреляции относительных содержаний для следующих пар элементов: Na-Mg ($r=0.60$), Na-Ca ($r=0.47$), Ti^+ -Ca ($r=0.58$), примеры даны на рис. 2а, б. По крайней мере, часть этих корреляций не отражает реальные вариации химического состава от звезды к звезде. В этом легко убедиться, сравнивая определения содержания данного элемента по линиям нейтральных атомов и по линиям ионов (например, $[\text{Ti}/\text{Fe}]$ с $[\text{Ca}/\text{Fe}]$ не коррелируют, $r=-0.23$, тогда как $[\text{Ti}^+/\text{Fe}]$ и $[\text{Ca}/\text{Fe}]$ слабо коррелируют, $r=0.58$). Мы сравнили коэффициенты корреляции величин $\lg \epsilon(X)$ с величинами $\lg \epsilon(\text{Fe})$, определенными по линиям FeI и FeII. Значимых различий между этими двумя рядами r нет, однако коэффициенты корреляции всегда выше, если содержание элемента (X) определено по линиям нейтральных атомов.

Рис.2. Корреляции содержаний Na, Ca, Mg, определенных относительно среднего химического состава F-карликов в скоплениях.



Мы сопоставили величины $\lg \epsilon(X)$ с параметрами моделей атмосфер T_e , $\lg g$ и ξ_t и величиной S_χ , характеризующей наклон зависимости $\lg \epsilon(\text{Fe})$ от потенциала возбуждения нижнего уровня χ_L . Значимые корреляции содержания элементов с T_e и $\lg g$ отсутствуют. Обнаружены корреляции для следующих пар: $\{S_\chi; [\text{Na}/\text{Fe}]\}$, $r=0.59$; $\{\xi_t; [\text{Na}/\text{Fe}]\}$, $r=-0.48$; $\{\xi_t; [\text{Ca}/\text{Fe}]\}$, $r=-0.67$.

Затем мы выполнили поиск корреляций относительных содержаний $[X/\text{Fe}]$ с периодом изменения блеска. Такие корреляции найдены для трех элементов: Si^+ ($r=-0.62$), Ca ($r=-0.51$), Sc^+ ($r=0.59$) (см. рис. 3а, б, в, соответственно). Содержание кремния, определенное по линиям нейтрального кремния, с периодом не коррелирует ($r=-0.16$), так что и в этом случае считаем, что, по крайней мере, зависимость, приведенная на рис. 3а, имеет методическое происхождение.

Для оценки степени влияния отклонений от ионизационного равновесия на величину $[X/\text{Fe}]$ мы сопоставили величины $[X/\text{Fe}]_{\text{FV}}$ и $[X/\text{Fe}]_{\text{FI}}$ с потенциалами первой и второй ионизации атомов. Если такие отклонения существуют, то их величина должна

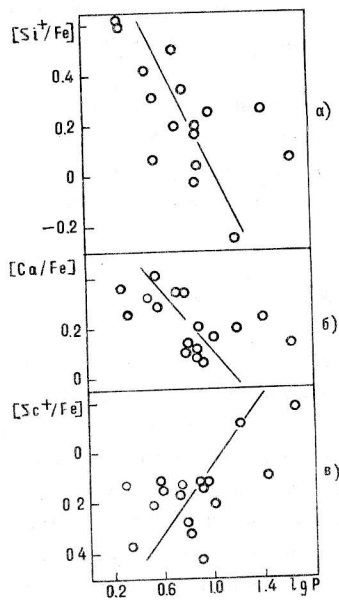
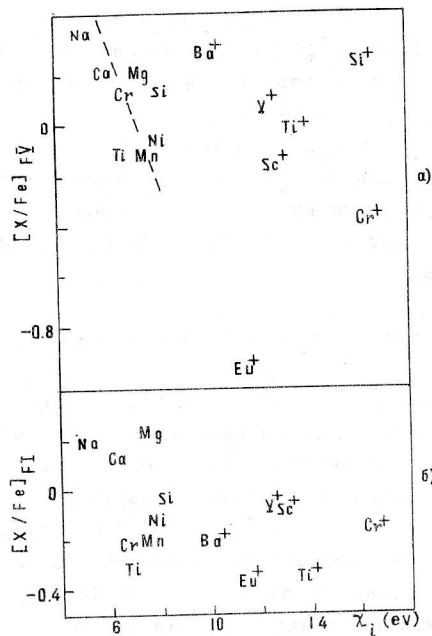


Рис.3. Корреляции периодов изменения блеска цефеид и содержаний Si, Ca, Sc, определенных по линиям нейтральных атомов и ионов относительно F-карликов в скоплениях.

Рис.4. Сопоставление разности средних относительных распространенностей химических элементов с потенциалами ионизации атомов и ионов, по спектрам которых определен химический состав. а) Цефеиды относительно F-карликов; б) цефеиды относительно F-сверхгигантов.



быть связана с долей ультрафиолетового потока, способного ионизовать данный атом или ион. Тогда величины $[X/Fe]$, определяемые по линиям нейтральных атомов, должны коррелировать с потенциалами ионизации, а $[X/Fe]$, определяемые по линиям однократно ионизованных атомов, - с потенциалами вторичной ионизации. Такая корреляция найдена для величин $[X/Fe]_{FV}$, определяемых по нейтральным атомам (пунктир на рис.4а). В случае, если в качестве опорного химсостава выбран химсостав сверхгигантов в скоплениях, относительные содержания не связаны с потенциалами ионизации χ_1 (рис.4б). Итак, из рис.4а следует, что относительно атмосфер F-карликов в атмосферах цефеид мы наблюдаем избыток легкоионизируемых атомов и дефицит содержания европия, определенного по линиям Eu^+ . Из рис.4б следует, что относительно F-сверхгигантов высокой светимости в атмосферах цефеид мы наблюдаем повышенное содержание нейтральных атомов Na, Ca, Mg и пониженное содержание атомов Si, Ti, Cr, Mn, Ni, ионов Sc^+ , Ti^+ , Cr^+ , Y^+ , Ba^+ , Eu^+ . Этот вывод справедлив лишь в том случае, если несоответствия моделей реальным атмосферам, проявляющиеся при переходе между сравниваемыми типами звезд, не превосходят по степени влияния искомые эффекты отклонений от ионизационного равновесия.

Отметим, что для нашей выборки цефеид получено пониженное содержание кислорода (относительно F-сверхгигантов), которое определялось по эквивалентным ширинам

запрещенной линии [OI], $\lambda 6300\text{\AA}$. Выше уже сказано, что для атмосфер цефеид несолнечные содержания CNO-элементов объясняются выносом вещества, переработанного в реакциях CNO-цикла. По нашим данным, эффект мало значим, по-видимому, из-за ошибок, вызванных блендированием линии кислорода при использованном спектральном разрешении, впоследствии мы планируем более тщательно определить содержание кислорода с применением метода синтетического спектра. Относительно других, изученных нами по спектрам цефеид, химических элементов можно утверждать, что в пределах точности метода их содержание $[X/Fe]$ соответствует солнечным значениям. К аналогичному выводу по менее обширным выборкам цефеид пришли ранее Харрис, Пилачовски (1981), Уоллерстейн и др. (1984), Сэнвал и др. (1986, 1988), Лак, Бонд (1986, 1989).

Натрий в атмосферах цефеид

Вывод об избытке натрия в атмосферах F-звезд высокой светимости не является новым и неоднократно обсуждался, как для гигантов, так и для сверхгигантов (Уоллерстейн и др., 1984; Сэсселов, 1986; Боярчук и др. 1988а, б; Лак, Бонд, 1989; Спит и др., 1989). Такой неспадающий интерес к содержанию натрия в атмосферах звезд высокой светимости обусловлен довольно редкой возможностью тестировать существующие в современной астрофизике представления о процессах нуклеосинтеза и перемешивания звездного вещества. Единой точки зрения на наблюдаемый избыток натрия пока не существует. В расчетах Боярчука и др. (1988а, б) показано, что не-ЛТР поправки для содержания натрия по субординатным линиям пренебрежимо малы, поэтому авторами сделан вывод, что наблюдается реальный избыток натрия, возникающий за счет синтеза натрия в Ne-Na цикле на стадии горения водорода в ядре. Наблюдаемая зависимость избытка натрия от ускорения силы тяжести $\lg g$ интерпретируется как зависимость выхода продуктов ядерного процесса от массы звезды (Денисенков, Иванов, 1987; Денисенков, 1989). Следует подчеркнуть, что для согласования наблюдаемых корреляций избытка натрия с $\lg g$ и с массой у F-сверхгигантов выдвигается неконтролируемое наблюдениями предположение об изначальном содержании неона для этих объектов, втрое превосходящем солнечное (Денисенков, 1989).

Необходимо остановиться на влиянии эффектов отклонения от ЛТР на результаты, полученные по распространенности химических элементов по спектрам A- и F-звезд с применением однородных моделей в приближении ЛТР. В настоящее время делаются попытки корректировать подобные расчеты, принимая во внимание более реалистические модели структуры атомных термов и учитывая повышенную ионизацию УФ-излучением. Совершенствование расчетов позволило выявить ряд эффектов даже при анализе спектров нормальных A-звезд ГП, интерпретация которых методом моделей атмосфер считалась наиболее надежной. Для оценки влияния эффектов отклонения от ЛТР рассчитываются отношения заселенностей атомных уровней $n(\text{не-ЛТР})/n(\text{ЛТР})$ методом полной линеаризации. Подобные расчеты, например, проведены для атомов Fe, Mg, Ba в атмосфере Веги ($T_e=9500$, $\lg g=3.9$) Гигасом (1986, 1988). В приближении бланкетированных ЛТР-моделей атмосферы Куруча (1979) Гигас определил поправки к содержаниям перечисленных элементов, возникающие из-за неравновесных населенностей уровней. Полученные поправки малы ($\approx 0.03\text{dex}$) для линий MgI, MgII и FeII и существенны ($\approx 0.3\text{dex}$) для линий нейтрального железа и бария. Лемке (1989, 1990) определил содержание металлов для 16 нормальных A-звезд с узкими линиями. Он также указывает на существенные не-ЛТР поправки для $\lg \epsilon(\text{FeI})$, однако отмечает их ненадеж-

ность из-за неточности используемых сечений фотоионизации. Несмотря на то, что сверхионизация не влияет на величину $\lg \epsilon(\text{FeII})$, Лемке отмечает, что не следует при оценке металличности ориентироваться на линии ионов железа, так как они гораздо сильнее линий FeI, а, следовательно, чувствительнее к точности используемых констант затухания и микротурбулентности. По этим причинам линии FeI предпочтительнее, чем FeII, по крайней мере, при поиске вариаций химического состава для выборки звезд. Истинное же значение содержания железа, по мнению Лемке, лежит где-то между приближениями ЛТР и не-ЛТР. В случае Проциона ($T_e=6500$, $\lg g=4.0$) поправки из-за сверхионизации в условиях ЛТР для FeI составляют около 0.10–0.15dex и близки к нулю для ионов FeII (Стеффен, 1985). Блэквелл и др. (1987) показали, что аномальное поведение линий нейтрального титана и хрома в солнечной фотосфере обусловлено проявлением неравновесных заселенностей уровней с низкими потенциалами возбуждения, а не ошибками сил осцилляторов или эквивалентных ширин. Подчеркнуто особенно аномальное поведение мультиплета 18 SrI (уклонение содержания на 35%). Боярчук и др. (1985, 1988а, б) оценили влияние эффектов отклонения от условий ЛТР в атмосферах F-сверхгигантов на содержание железа и натрия. Их методика позднее была применена Бикмаевым и др. (1990а, б) к анализу спектра железа и бария для выборки субкарликов в широком интервале металличности. В задаче выявления отклонений от ЛТР субкарлики имеют существенное преимущество, поскольку их достаточно большие тригонометрические параллаксы позволяют независимым образом, не привлекая теоретические модели атмосфер, определить абсолютную светимость. Результаты расчетов для железа совпадают для спектров F-сверхгигантов и субкарликов: атомы нейтрального железа подвержены процессу сверхионизации, что приводит к занижению $\lg \epsilon(\text{FeI})$ на 0.4–0.7dex в зависимости от величины УФ-потока звезды.

Поскольку присущие звездам разных типов и популяций особенности на кривой распространенности содержаний химических элементов, объясняемые в рамках существующих в современной астрофизике представлений эффектами эволюции индивидуальных звезд и Галактики в целом, невелики (как правило, величины $[X/\text{Fe}]$ не превышают 0.5–0.7dex), то можно предположить, что все они обусловлены неточностями теоретических моделей атмосфер и описания структуры атомных уровней. Такое предположение сделано, например, относительно аномалий O, Na, Mg, Al в атмосферах красных гигантов в шаровых скоплениях (Пилачовски, 1988), а также избытка кислорода и проявления odd-even-эффекта для Na, Mg, Al в атмосферах субкарликов с дефицитом металлов (Магэйн, 1988). Однако, по-видимому, такой радикальный вывод, перечеркивающий современную картину эволюции химического состава галактических популяций, все же представляется преждевременным. Рассчитанные не-ЛТР поправки к содержаниям элементов можно рассматривать лишь как очередное приближение, поскольку расчеты выполнены с применением моделей в приближении ЛТР. Кроме того, авторы проведенных расчетов отмечают крайнюю необходимость уточнения используемых атомных констант, параметров уширения линий, сечений процессов фотоионизации и рекомбинации, вероятностей переходов. Гигас (1988) упомянул, что величина не-ЛТР поправки для ионов бария существенно меняется при изменении числа рассматриваемых уровней атома. Что касается наблюдаемых отклонений на кривой распространенности для старых звезд, то реальность их следует прежде всего из совпадения общих тенденций в поведении величин $[X/\text{Fe}]$, полученных по объектам с существенно различающимися параметрами атмосфер. Хорошей иллюстрацией этим общим закономерностям может служить рис.3 из обзора Уиллера и др., (1989), на котором приведены

величины $[\alpha/Fe]$ для звезд в широком интервале светимостей (субкарлики и гиганты гало) и эффективных температур (3800-6300К). Более того, наши результаты (Клочкова, Панчук, 1988г) по элементам α -процесса в атмосферах звезд на стадии горизонтальной ветви с $T_e \approx 8000K$ превосходно сочетаются с данными Уиллера и др. (1989). Важно отметить и широкий интервал металличностей (от солнечного значения до дефицита на 3 порядка), в котором сохраняется величина избытка элементов α -процесса, следовательно, можно говорить и о существенных вариациях Уф-излучения, выходящего из горячих слоев звезды и контролирующего процессы фотоионизации. Из независимости химического состава от температуры в интервале $T_e \approx 6000-10000K$, полученной в нашем исследовании А и F-карликов в скоплениях, также следует несущественность искажений, вызываемых применением приближения ЛТР.

Имеющиеся расчеты не-ЛТР поправок для натрия пока не согласуются у разных авторов. Боярчук и др. (1988а, б) оценили отклонения от равновесных заселенностей уровней атома натрия. Рассмотрев модель нейтрального атома с 19 уровнями, они пришли к выводу о том, что изменения эквивалентных ширин при отказе от ЛТР обычно не превышают 10% относительно ЛТР, поправки к обилиям при этом $\Delta \lg \epsilon < 0.1$. Однако, на основании уточненной модели атома (47 уровней) (Дрейк, 1990) получены нулевые поправки для атмосферы Солнца и значительные, способные объяснить наблюдаемые избытки, для линий мультиплетов 1, 4, 6 в случае сверхгигантов. Отметим, что линии мультиплетов 4 и 6 образованы в переходах с уровня $3p^2P^0$, который является верхним при формировании дублета NaD, чувствительного к эффектам отклонения от условий ЛТР.

Ясно, что сверхионизация, как причина неравновесных заселенностей уровней в атмосферах цефеид, не может рассматриваться, поскольку наблюдаются избытки легкоионизируемых металлов и в случае сверхионизации следовало бы ожидать их дефицита.

Более распространенным является объяснение избытка натрия в спектрах звезд высокой светимости методическими причинами, отклонениями от равновесных заселенностей уровней атомов (Уоллерстейн, и др. 1984; Лак, Бонд, 1989; Спит и др., 1989; Грэттон и др., 1989; Грэттон, Снеден, 1990). Подтверждением этой точки зрения являются, во-первых, небольшие избытки легких элементов в спектрах и нормальных массивных F-сверхгигантов, членов молодых рассеянных скоплений диска. Во-вторых, если признать реальными избытки натрия в атмосферах цефеид диска, то непонятен физический процесс, вызывающий значительные избытки натрия в атмосферах долгопериодических переменных гало - звезд типа RV Tau. Из факта наличия звезд типа RV Tau в шаровых скоплениях можно судить о низких массах ($M < 1M_{\odot}$) этих далеко проэволюционировавших звезд. Согласно данным Лака и Бонда (1989), для классических звезд этого типа RU Cen и U Mon избыток $[Na/Fe] \approx 0.5-0.7dex$. В третьих, следует иметь в виду, что, помимо натрия, в атмосферах сверхгигантов наблюдаются (Спит и др., 1989 и данные табл. 1) сравнимые по величине избытки и других легких металлов (Mg, Si, Ca, Al), для которых трудно указать ядерные реакции синтеза в процессе горения водорода.

Имеется возможность независимой проверки представлений о содержании натрия в недрах звезд, прошедших стадию горения водорода в CNO-цикле, а именно: анализ химического состава планетарных туманностей (PN). Предками PN на стадии ГП были звезды умеренных масс $M = 3-8 M_{\odot}$ (Потташ, 1987), следовательно, мы вправе ожидать, в соответствии с расчетами Денисенкова, Иванова (1987), образования в нед-

рах этих звезд дополнительного количества натрия, что должно отразиться на химическом составе будущей PN. Однако, как следует из спектроскопии PN (Клегг, 1989), избыток натрия по отношению к иным легким элементам (неон, сера, аргон, калий) не обнаружен, в то время как относительное содержание CNO-элементов соответствует теоретическим расчетам процесса эволюции звезд соответствующих масс.

В целом, пришли к выводу, что классический метод определения химического состава, применяемый к атмосферам цефеид, приводит как к снижению внутренней точности метода, так и к систематическим ошибкам $\sigma[X/Fe]$, причем величина последних зависит от того, какой набор линий в спектрах исследуемых и стандартных звезд использован при определении средних $\lg \epsilon(X)$. Принципиальное ограничение на точность определения химического состава по одной спектрограмме налагается не точностью измерений эквивалентных ширин, а надежностью используемых моделей атмосфер и методом определения их параметров. Пока рано говорить о том, что взаимные корреляции содержания некоторых элементов, особенности на кривой распространности и связь этих особенностей с периодом изменения блеска отражают эффекты эволюции химического состава.

Учитывая вышеизложенные сложности и неопределенности анализа химического состава цефеид, оценку радиального градиента химического состава диска Галактики по спектрам цефеид логичнее, по-видимому, выполнять по методу одной линии, примененному для оценки дисперсии металличности (Клочкова и др., 1991).

Литература

- Бикмаев И. Ф., Бобрицкий С. С., Сахибуллин Н. А.: 1990а, Письма в астрон. ж., 16, 213.
- Бикмаев и др. (Bikmaev I. F., Bobritskij S. S., El'kin V. G., et al.): 1990б, in: Evolution of stars: the photospheric abundance connection. Poster papers presented at the 145th Symp. IAU. Ed. G. Michaud et al., 3.
- Боярчук А. А., Любимков Л. С., Сахибуллин Н. А.: 1985, Астрофизика, 22, 339.
- Боярчук А. А., Губены И., Кубат И., Любимков Л. С., Сахибуллин Н. А.: 1988а, Астрофизика, 28, 343.
- Боярчук А. А., Губены И., Кубат И., Любимков Л. С., Сахибуллин Н. А.: 1988б, Астрофизика, 28, 335.
- Блэквелл и др. (Blackwell D. E., Booth A. J., Menon S. L. R. et al.): 1987б, Astron. & Astrophys., 180, 223.
- Гигас (Gigas D.): 1986, Astron. & Astrophys., 165, 170.
- Гигас (Gigas D.): 1988, Astron. & Astrophys., 192, 264.
- Грэттон и др. (Gratton R. G., Focardi P., Bandiera R.): 1989, Mon. Not. R. Astron. Soc., 237, 1085.
- Грэттон, Снеден (Gratton R. G., Sneden C.): 1990, Astron. & Astrophys., 234, 366.
- Густафссон (Gustafsson B.): 1983, Publ. Astron. Soc. Pacific, 95, 101.
- Денисенков П. А.: 1989, Астрофизика, 31, 293.
- Денисенков П. А., Иванов В. В.: 1987, Письма в астрон. ж., 13, 520.
- Дравиньш (Dravins D.): 1990, in: Solar photosphere: structure, convection and magnetic fields. Ed. J.O.Stenflo. IAU Symp., No. 138, Kiev, May 15-20, 1989, 397.

- Дрейк (Drake J. J.): 1990, in: Evolution of stars: the photospheric abundance connection. Poster papers presented at the 145th Symp. IAU. Ed. G. Michaud et al., 111.
- Клегр (Clegg R. E. S.): 1989, in: Planetary Nebulae. Proc. of the 131 Symp. IAU. Dordrecht, Kluwer Acad. Publ. 139.
- Клочкова В. Г., Панчук В. Е.: 1988а, *Астрофиз. исслед.* (Изв. САО), **26**, 14.
- Клочкова В. Г., Панчук В. Е.: 1988б, *Письма в астроном. ж.*, **14**, 77.
- Клочкова В. Г., Панчук В. Е.: 1988в, *Письма в астроном. ж.*, **14**, 933.
- Клочкова В. Г., Панчук В. Е.: 1988г, *Астрофиз. исслед.* (Изв. САО), **26**, 27.
- Клочкова В. Г., Панчук В. Е.: 1991, *Письма в астроном. ж.*, **17**, 536.
- Клочкова В. Г., Панчук В. Е., Цымбал В. В.: 1985, *Астрофиз. исслед.* (Изв. САО), **19**, 22.
- Клочкова В. Г., Панчук В. Е., Цымбал В. В.: 1991, *Астрофиз. исслед.* (Изв. САО), **33**, 41.
- Куруч (Kurucz R. L.): 1979, *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, **40**, 1.
- Лак и Бонд (Luck R. E., Bond H. E.): 1986, *Space Telescope Sci. Inst., Preprint Ser.*, No. 96, 1.
- Лак и Бонд (Luck R. E., Bond H. E.): 1989, *Astrophys. J.*, **342**, 476.
- Лак и Ламберт (Luck R. E., Lambert D. L.): 1981, *Astrophys. J.*, **245**, 1018.
- Леду и Уитни (Ledoux P., Whitney C. A.): 1964, в кн.: *Космическая газодинамика*, ред. Р. Томас, М.: Мир.
- Лемке (Lemke M.): 1989, *Astron. & Astrophys.*, **225**, 125.
- Лемке (Lemke M.): 1990, *Astron. & Astrophys.*, **240**, 331.
- Магэйн (Magain): 1988, in: The impact of very high S/N spectroscopy on stellar physics. IAU Symp. No. 132, Dordrecht, 485.
- Парсонс (Parsons S. B.): 1969, *Astrophys. J. Suppl.*, **18**, 127.
- Пилачовски (Pilachowski C. A.): 1988, in: The abundance spread within globular clusters: spectroscopy of individual stars, IAU General Assembly, Baltimore, 1.
- Потташ С. *Планетарные туманности*. М.: Мир, 1987.
- Росс, Аллер (Ross J. E., Aller L. H.): 1976, *Science*, **191**, 1223.
- Спит и др. (Spite F., Spite M., Francois P.): 1989, *Astron. & Astrophys.*, **210**, 25.
- Стеффен (Steffen M.): 1985, *Astron. & Astrophys., Suppl.*, **59**, 403.
- Сэнвал и др. (Sanwal B. B., Rautela B. S., Joshi G. C.): 1986, *Astrophys. Space Sci.*, **123**, 183.
- Сэнвал и др. (Sanwal B. B., Rautela B. S., Joshi G. C.): 1988, *Astrophys. Space Sci.*, **140**, 131.
- Сэсселов (Sasselov D. D.): 1986, *Publ. Astron. Soc. Pacific*, **96**, 561.
- Уиллер и др. (Wheeler J. C., Sneden C., Truran J. W. Jr.): 1989, *Ann. Rev. Astron. Astrophys.*, **27**, 279.
- Уоллерстейн и др. (Wallerstein G., Pilachowski C. A., Harris N. C.): 1984, *Publ. Astron. Soc. Pacific*, **96**, 613.
- Харрис и Пилачовски (Harris N. C., Pilachowski C. A.): 1981, *Astrophys. J.*, **282**, 655.

Поступила в редакцию
30 января 1991 г.