

ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ПРОЦИОНА. АНАЛИЗ МЕТОДОМ МОДЕЛЕЙ АТМОСФЕР

В. В. Леушин, В. В. Соколов

Для описания реальной атмосферы Проциона выбрана модель Эдмондса с параметрами $T_{\text{ef}}=6385$ К и $\lg g=4.107$. Затем были выбраны линии для счета контуров с учетом ограничений, возникающих из-за гипотезы ЛТР. Для уточнения химического состава были построены 40 наблюдаемых контуров. Для них построены теоретические контуры, по которым определено относительное содержание данного элемента в атмосфере. Таким образом, получены точные сведения о содержании 12 элементов относительно водорода и решен вопрос о калибровке кривой химического состава, построенной по данным грубого анализа с помощью кривой роста. По сравнению с химическим составом Солнца Na и элементы группы железа (V, Mn, Ni, Zn, Ga) обнаруживают дефицит (от 0.4 до 1.0 в логарифме числа атомов в зависимости от элемента). Ошибка определения содержания в основном обусловлена неуверенностью в задании атомных параметров и лежит в пределах $\pm 0.1-0.4$ в логарифме числа атомов.

To describe the real atmosphere of Procyon Edmond's model was chosen with the parameters $T_{\text{ef}}=6385$ K and $\lg g=4.107$. Then lines were chosen for counting the contours allowing for the restrictions arising due to LTE hypothesis. To specify chemical composition 40 observed contours were constructed. For those theoretical contours were made which served for determination of the relative content of the element in the atmosphere. In such a way precise data on the content of twelve elements relative to hydrogen was obtained, and the problem of calibration of the chemical composition curve, constructed on the basis of rough analysis with the help of the curve of growth, was solved. In comparison with chemical composition of the Sun Na and the element of the iron group (V, Mn, Ni, Zn, Ga) show deficit (from 0.4 to 1.0 in the logarithm of the number of atoms depending on the element). The determination error in the abundance is mainly due to the uncertainty of the given atomic parameters and lies within $\pm 0.1-0.4$ in the logarithm of the number of atoms.

Полное определение химического состава звездной атмосферы предполагает нахождение содержаний всех элементов относительно водорода. Такая процедура практически невыполнима без привлечения к анализу метода моделей атмосфер, поскольку только с помощью этого метода возможно определение отношения содержаний водорода, гелия и остальных элементов для одного и того же элемента объема атмосферы.

Классический метод сравнения наблюдаемых значений эквивалентных ширин с теоретическими кривыми роста для моделей Шустера—Шварцшильда или Милна—Эддингтона может дать относительную распространенность практически всех элементов, но с одним важным исключением: содержание водорода и гелия здесь не определяется.

Вообще говоря, для водорода и гелия тоже можно получить данные о содержании в атмосфере, но их нельзя сравнивать с результатами для остальных элементов, так как эти данные будут получены для разных объемов в атмосфере звезды.

Существует еще один метод калибровки кривой относительной распространенности элементов — это совмещение ее либо с аналогичной кривой для среднего химического состава нормальных звезд (что это такое, впрочем, сейчас не совсем ясно), либо с кривой химического состава Солнца. Но при таком способе более или менее уверенные результаты можно

получить только в случае отсутствия каких-либо аномалий в химическом составе исследуемой звезды, в противном же случае результаты становятся в большой степени неопределенными.

Поэтому для определения содержания элемента относительно водорода остается один путь — теоретический расчет с помощью моделей атмосфер интенсивностей линий данного элемента при разных предположениях о его содержании относительно водорода и сравнение этих результатов с наблюдениями. Одна из трудностей подобного анализа заключена в выборе моделей для исследуемой звезды. Очевидно, что для этого нужно располагать как сеткой подходящих моделей, так и достаточно подробными сведениями об атмосфере. Для получения таких сведений совершенно необходимо изучить звезду с помощью метода кривых роста.

Целью настоящего исследования является получение более точных данных о содержании химических элементов в атмосфере Проциона, а также решение вопроса о калибровке кривой химического состава, поставленного в работе [1].

Выбор модели атмосферы Проциона. Определение модели атмосферы для конкретной звезды включает, во-первых, составление группы моделей для различных приемлемых химических составов, ускорений сил тяжести на поверхности и эффективных температур, а затем выбор той модели, которая лучше всего соответствует спектру звезды.

Группа из восьми несерых моделей атмосфер Проциона (F 5 IV) была рассчитана в работе [2]. Параметры этих моделей приводятся в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1
Параметры моделей Проциона по [2]

Параметр	Модель							
	1	2	3	4	5	6	7	8
T_{ef}	6385	6385	6685	6685	6385	6385	6685	6685
$\lg N (M)$	8.6	8.6	8.6	8.6	7.8	7.8	7.8	7.8
$\lg N (He)$	10.68	11.11	10.78	11.11	10.78	11.11	10.78	11.11
$\lg g_{ef}$	4.107	4.212	4.187	4.291	4.107	4.212	4.187	4.291

Со времени опубликования работы [2] появилось много исследований, посвященных машинным методам расчета моделей атмосфер. Например, атмосфера Проциона может быть описана моделью с параметрами $T_{ef} = 6500$ К и $\lg g = 4$, которая взята из сетки моделей [3].

Как отмечалось в работе [1], учитывая значения температур, полученных из кривых роста, атмосфера Проциона должна описываться моделями Эдмондса с $\theta_{ef} = 0.79$, хотя по соотношению между $\lg P_e$ и θ больше подходят модели с $\theta_{ef} = 0.75$. Следовательно, этот вопрос требует детального рассмотрения.

Для более точного сопоставления расчетов Эдмондса с реальной атмосферой Проциона здесь были применены два метода. Первый метод — сравнение наблюдаемых контуров водородных линий (H_β , H_γ , H_δ) с теоретическими, рассчитанными по методу Грима (табл. 2). Второй — сравнение результатов теоретических вычислений с действительным распределением энергии в спектре Проциона и величиной бальмеровского скачка.

При построении наблюдаемых контуров водородных линий и сравнении их с расчетными учитывалось, что при использовании спектрограмм с высокой дисперсией ($D = 1.3 \text{ \AA/мм}$) крылья водородных линий тянутся очень далеко и теряются на фоне непрерывного спектра. Это приводит

ТАБЛИЦА 2
Эквивалентные ширины (W_λ , Å) и оптические глубины образования (τ_w)
водородных линий

Линия	W_λ , (эксперимент)	1	2	3	4	5	6	7	8
H_β	5.51	5.50	5.51	7.19	7.20	5.42	5.43	7.16	7.17
		0.696	0.695	0.675	0.677	0.685	0.686	0.667	0.669
H_γ	6.26	6.70	6.71	8.88	8.88	6.62	6.64	8.86	8.86
		0.848	0.848	0.836	0.837	0.837	0.838	0.828	0.829
H_δ	6.32	6.78	6.80	8.98	8.98	6.71	6.73	8.94	8.95
		0.936	0.936	0.929	0.930	0.925	0.926	0.920	0.922

к некоторой свободе сдвига по вертикальной оси наблюдаемых контуров при сравнении с теоретическими.

Из рис. 1, где сопоставлены наблюдаемые и теоретические контуры водородных линий, видно, что контуры, рассчитанные для моделей 1, 2, 5, 6 ($T_{\text{ef}}=6585$ K) во всей области, кроме самой центральной части $\Delta\lambda < 0.5$ Å, хорошо согласуются с наблюдаемыми. Для центральной же области наблюдаемая интенсивность ниже расчетной, а различие в эквивалентных ширинах теоретических и экспериментальных кривых $\Delta W_\lambda \sim f_{ik}$ (где f_{ik} — сила осциллятора линии). Можно предположить, что указанное расхождение вызвано более сильным падением температуры к поверхности в атмосфере Проциона, чем в моделях Эдмондса. Это приводит к увеличению потока в центральных областях теоретических контуров.

Для второй группы моделей (3, 4, 7, 8) с более высокой эффективной температурой ($T_{\text{ef}}=6685$ K) теоретические линии более интенсивны: они имеют значительно большие величины глубин и эквивалентных ширин (табл. 2).

Нами был также проведен расчет контуров водородных линий (H_β , H_γ , H_δ) для модели с $T_{\text{ef}}=6500$ K и $\lg g=4$ из работы [3]. Как видно на рис. 1, результат мало отличается от соответствующих результатов расчета по моделям 1, 2, 5, 6. По-прежнему наблюдаемая центральная интенсивность в этих линиях ниже расчетной — следствие более быстрого падения температуры к поверхности в атмосфере Проциона, чем в модели.

Для сравнения наблюдаемого непрерывного спектра и бальмеровского скачка Проциона с рассчитанными теоретически распределение энергии в спектре Проциона бралось из [4], где приведена $E(\lambda)$, эрг/(см²·с·см) — освещенность, создаваемая за пределами земной атмосферы, которая относится к интегральному спектру, т. е. континууму вместе с линиями поглощения. Интервал усреднения 50 Å.

Теоретические расчеты потока ($\lg H_\lambda$) в непрерывном спектре проводились на основе рассчитанной сетки коэффициентов κ_λ в интервале 3500—6000 Å. На рис. 2, где сопоставлены результаты этих расчетов с экспериментальным непрерывным спектром, видно, что теоретические кривые, как и для линий водорода, образуют две группы. В первую входят модели 1, 2, 5, 6 с $T_{\text{ef}}=6385$ K, во вторую — модели 3, 4, 7, 8 с $T_{\text{ef}}=6685$ K. Они отличаются величиной бальмеровского скачка: для моделей 1, 2, 5, 6 наибольшее значение $D=0.19$, для моделей 3, 4, 7, 8 — 0.22.

При сравнении наблюдаемого непрерывного спектра с рассчитанным из этих двух групп была выбрана группа с меньшей температурой $T_{\text{ef}}=6385$ K, так как для нее наклон кривых ближе к наблюдаемому. В области длин волн $\lambda < 4500$ Å между наблюдениями и теорией существует заметное расхождение: поток излучения в спектре Проциона имеет зна-

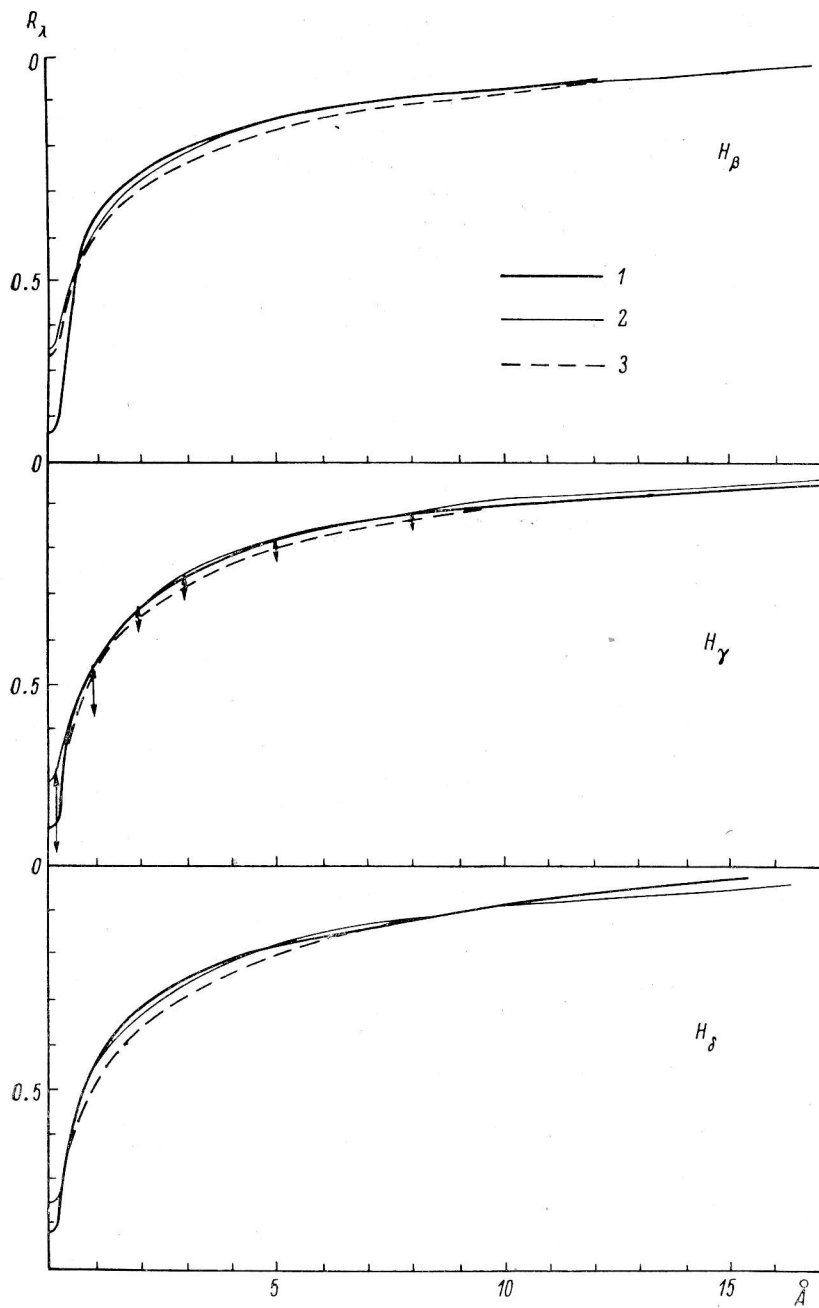


Рис. 1. Контуры водородных линий.

1 — наблюдаемые; 2, 3 — теоретические 1, 2, 5, 6 (2 — Эдмондса, 3 — Пьетремана).
 Стрелками указан возможный разброс экспериментальных значений интенсивности.

чительно меньшее значение, чем рассчитанный по моделям (различие доходит до 0.15 в десятичном логарифме).

Часть этого расхождения (по-видимому) может быть объяснена поглощением в линиях, особенно перекрывающимися водородными линиями серии Бальмера и H и KCa II, сильно понижающими наблюдаемый непрерывный спектр в области бальмеровского скачка, а также обилием линий металлов на участке спектра $3500 < \lambda < 4500 \text{ \AA}$. В этой области спектра учет линий поглощения может улучшить сходимость теоретических расчетов с наблюдениями. В то же время значительный избыток излучения в коротковолновой части спектра за бальмеровским скачком нельзя объяснить только отсутствием учета поглощения в линиях. Главную роль здесь, вероятно, играет слишком большая величина даже нижнего значения $T_{\text{ef}}=6385 \text{ K}$ модели.

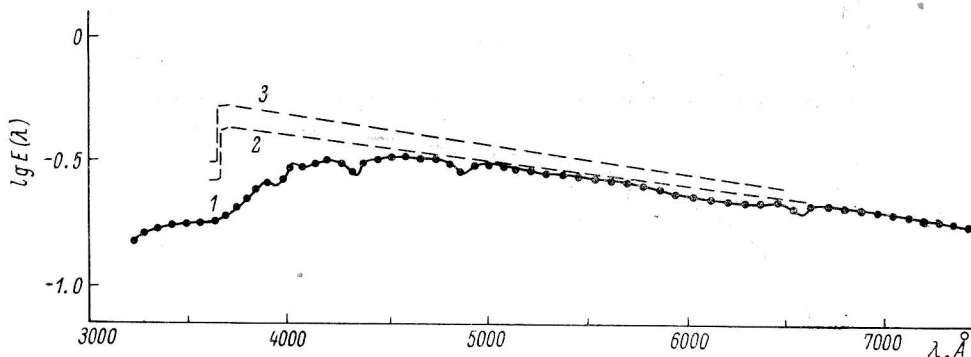


Рис. 2. Распределение энергии в спектре Прокциона.

1 — наблюдаемое; 2, 3 — теоретическое (2 — модели 1, 2, 5, 6; 3 — модели 3, 4, 7, 8).

Таким образом, в результате сравнения теоретических контуров водородных линий и непрерывного спектра с наблюдаемыми была выбрана группа моделей с $T_{\text{ef}}=6385 \text{ K}$, хотя нужно еще раз отметить, что, к сожалению, даже модели с малой T_{ef} не совсем точно описывают реальное распределение температуры в атмосфере Прокциона.

Модели в выбранной группе отличаются содержанием гелия $\lg N(\text{He})$ и содержанием металлов $\lg N(\text{M})$. У моделей 1 и 5, имеющих параметром $\lg N(\text{He})=10.78$, величина бальмеровского скачка больше, чем у моделей 2 и 6 [$\lg N(\text{He})=11.11$], и равна 0.19. Учитывая, что экспериментальное значение бальмеровского скачка Прокциона 0.21 [5], предпочтение было отдано моделям 1 и 5, которые отличаются только содержанием металлов.

Для выбора между ними использовались результаты работы [1], в которой проводились определение относительного содержания металлов в атмосфере Прокциона методом кривой роста и его сравнение с солнечным, а также определен интервал, в котором лежит значение содержания металлов относительно водорода. Нижняя граница этого интервала близка к значению для модели 1 [$\lg N(\text{M})=8.6$], а содержание металлов в модели 5 [$\lg N(\text{M})=7.8$] значительно ниже этой границы. Поэтому в дальнейшем все расчеты проводились для модели 1.

Выбор линий для счета контуров. Для уточнения химического состава Прокциона путем сравнения теоретических контуров с наблюдаемыми выбирались неблендированные линии средней и малой интенсивности. Ограничение на интенсивность накладывает гипотеза ЛТР, которая использована для счета по программе и в моделях. Подобный выбор возможен не для всех элементов. Мы ограничились расчетом контуров Na I; Al I; Mg I, II; Si I, II; Ca I, II; Ti II, I; VII; Cr I, II; Mn I; Fe I, II; Sr I, II; Eu II. Для каждого иона по возможности выбиралось по 2—4 линии.

В этой работе величины сил осцилляторов f_{ik} , используемые при расчетах контуров линий, взяты в основном из [6] и [7]. Однако, к сожалению, многие из них известны с недостаточной точностью. Об этом свидетельствует неудовлетворительная в отдельных случаях сходимость данных из различных источников. Это, естественно, затрудняет детальный анализ химического состава атмосферы звезды.

Для определения параметра $a = F_{ik} + \gamma_c / 4\pi \Delta \nu_D$ были рассмотрены соотношения различных механизмов уширения линий в зависимости от оптической глубины τ в атмосфере Проциона. При этом был сделан следующий вывод: так как оптические глубины формирования эквивалентных ширины линий порядка 0.1—1.0, то линии металлов в спектре Проциона должны иметь доплеровское ядро и более или менее сильные штарковские крылья.

Параметры штарковского уширения (в зависимости от температуры) известны лишь для очень немногих элементов. В этой работе величины штарковских уширений для Na, Mg, Al, Si и Ca взяты из [7, 8]. Для линий остальных элементов использовалась приближенная формула из [9]:

$$\gamma_4 = 31.03_{10} 6 (\Gamma_S^0)^{2.15} P_e, \quad (1)$$

где $0.03 < \Gamma_S^0 < 0.4$.

Необходимые таблицы степеней ионизаций и сумм по состояниям взяты из работ [10]—[12]. Для Eu суммы по состояниям считались по формулам из [13].

Расчеты характеристик линий поглощения проводились с помощью методики и вычислительных программ, разработанных в САО АН СССР [14]. При расчете использовалась гипотеза ЛТР, что обусловлено применением моделей атмосфер, построенных в предположении, что механизмом формирования линий является истинное поглощение (с учетом рассеяния на свободных электронах).

Для микротурбулентной скорости в данной работе использовалась зависимость $v_t = v_0 / (1 + k\tau)$, которая была получена для Проциона в работе [1] из анализа кривых роста. Коэффициенты ($v_0 = 3.1$ км/с, $k = 2.76$) вычислялись методом наименьших квадратов.

Результатом счета контура являются: таблицы глубин линий R_λ с некоторым шагом по λ , эквивалентная ширина линии W_λ и глубина ее формирования $(\tau_0)_w$.

Сравнение теоретических и наблюдаемых контуров. Для уточнения химического состава были построены 40 наблюдаемых контуров для элементов Na, Mg, Al, Si, Ca, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Sr, Eu. Построение контуров проводилось по регистрограммам эшелных спектрограмм Проциона, которые исследовались в предыдущей работе [1]. В процессе этого исследования регистрограмм были обнаружены некоторые искажения глубин и эквивалентных ширины линий, на основе чего были построены поправочные графики. Они использовались в настоящей работе для исправления наблюдаемых контуров при их построении.

В результате анализа поправочных графиков были определены вероятные относительные ошибки для глубины R_λ и эквивалентной ширины W_λ . Для глубины ~ 0.5 она составляет 3—6%, причем меньшая точность наблюдается при малых R_λ . Вероятная относительная ошибка для эквивалентной ширины не зависит от величины R_λ и составляет $\sim 5\%$.

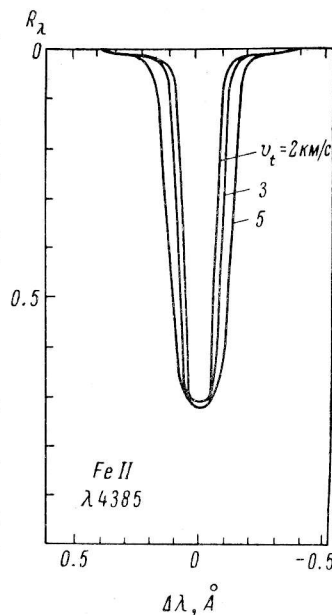


Рис. 3. Зависимость формы контура от величины микротурбулентной скорости v_t .

В процессе расчетов были получены теоретические контуры для различных значений параметров атмосферы и линии. Один из таких параметров — микротурбулентная скорость v_t . На рис. 3 показаны контуры линии Fe II λ 4385 для трех значений v_t . С ростом микротурбулентной скорости заметно увеличивается эквивалентная ширина линии и немного уменьшается ее глубина.

Введение в программу зависимости v_t от оптической глубины дает незначительное изменение вида контура, однако существенно меняет оптическую глубину формирования линии: она увеличивается для слабых

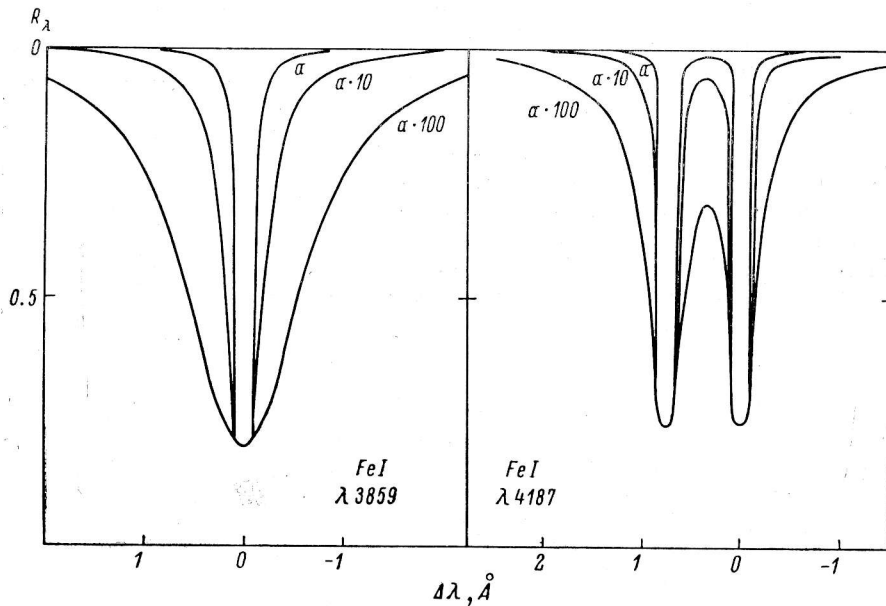


Рис. 4. Зависимость формы контура от параметра a .

и средних линий примерно на 0.05—0.1, а для насыщенных — на 0.15—0.25.

Следующий параметр — величина штарковского уширения. На рис. 4 показана зависимость вида контуров линий Fe I от величины параметра $a = F_{ik} + \gamma_c / 4\pi \Delta \nu_D$ при заданном содержании элемента. Видно, что линии весьма чувствительны к изменению штарковского уширения, происходит значительное увеличение крыльев и эквивалентной ширины.

Для многих линий штарковские уширения вычислялись по приближенной формуле (1), поэтому проводилось сравнение теоретических контуров с наблюдаемыми, и там, где это было необходимо, параметр a увеличивался до лучшего совпадения теории с наблюдениями.

На рис. 5 представлены экспериментальные контуры линий 12 элементов и результаты теоретических расчетов для них при различных значениях $\lg N_E$. Можно видеть, что основное отличие контуров, характерное для большинства линий, состоит в том, что наблюдаемый контур несколько шире теоретических. Это обстоятельство можно объяснить тем, что на экспериментальный контур могут действовать некоторые расширяющие его факторы: а) макротурбулентные движения в атмосфере; б) вращение звезды; в) инструментальный контур. Последний фактор не должен оказывать существенного влияния на ширину контура, так как $\Delta \lambda_{\text{инстр}} \approx 2 \cdot 10^{-2} \text{ \AA}$ [15].

Скорость вращения Проциона если и отлична от нуля [16], то составляет не более 3 км/с, что, естественно, не может дать заметный вклад

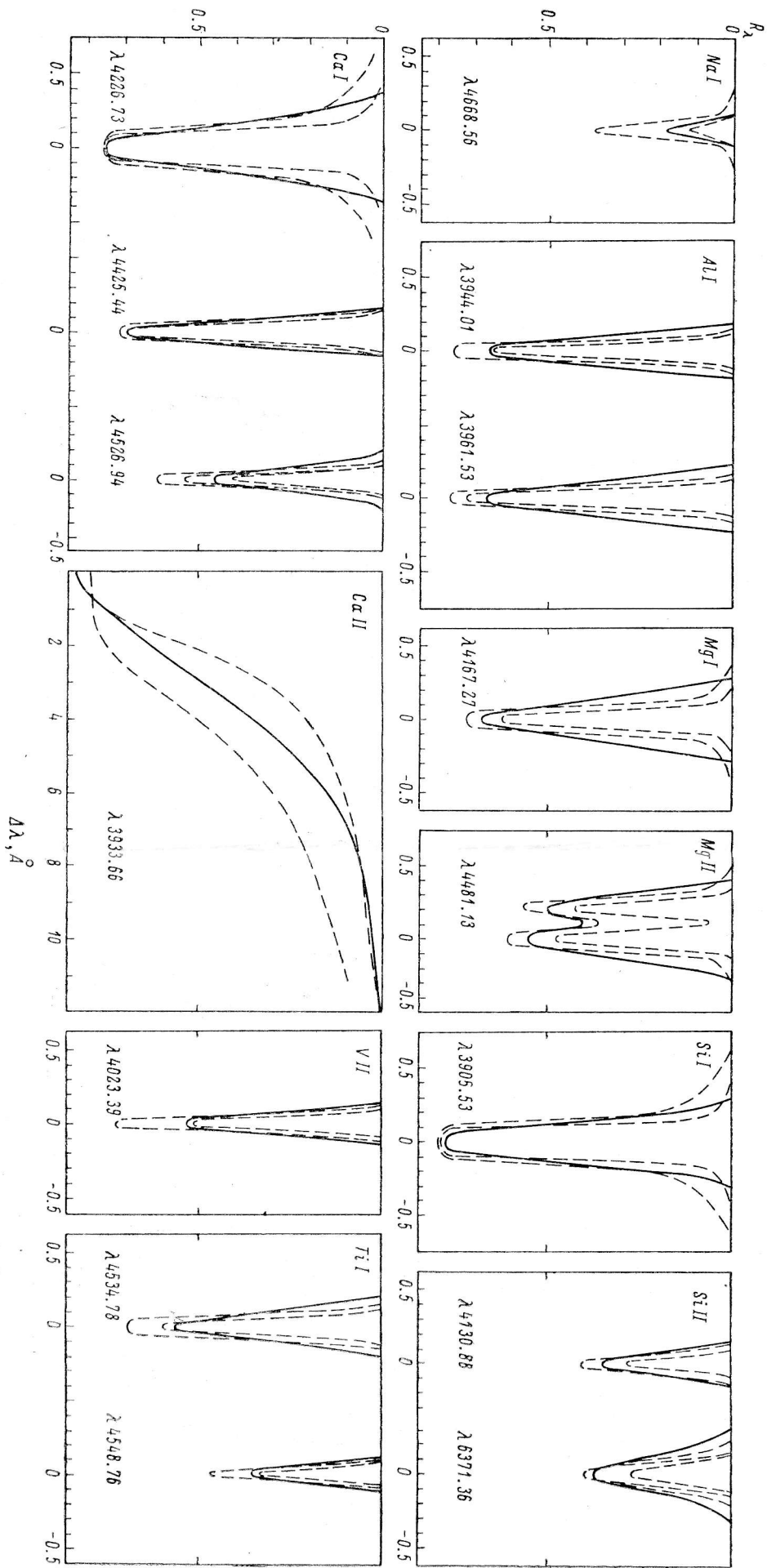


Рис. 5. Наблюдаемые контуры линий металлов *сильные и/или*) и георетические контуры для различных содержания элементов (*штриховые линии*).
 Величины содержания элементов, при которых расширялись приведенные контуры, отмечены в табл. 3 звездочкой.

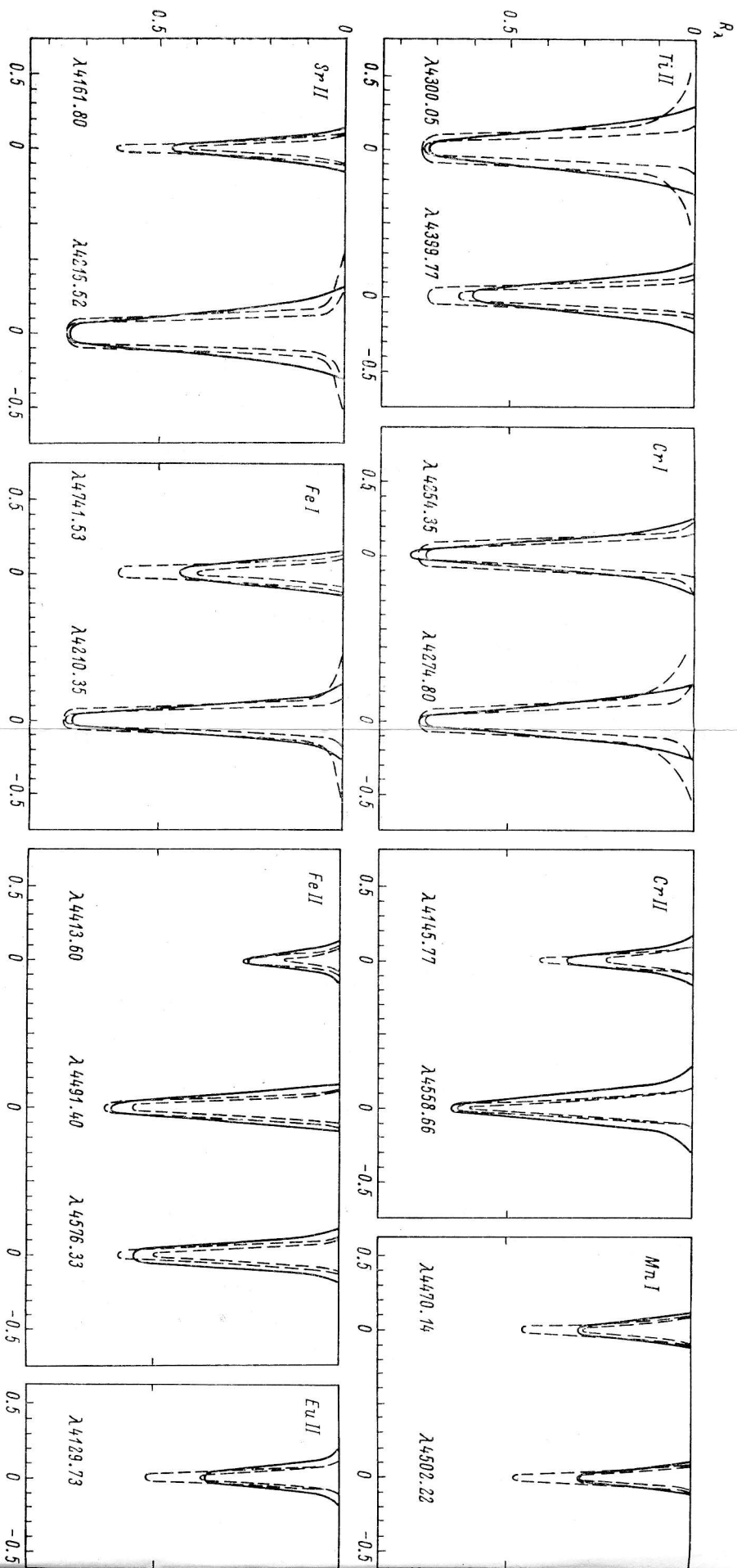


Рис. 5. (II подожжение).

в расширение контуров линий. Поэтому можно считать, что главным механизмом, расширяющим наблюдаемые контуры, является макротурбулентное движение в атмосфере Проциона.

Величина макротурбулентной скорости оценивалась методом ван ден Хевеля [17]. Результаты представлены на рис. 6. Макротурбулентная скорость получается равной $v_M = 2$ км/с. Метод одновременно дает и значение микротурбулентных скоростей $v_t = 2.4$ км/с, что хорошо согласуется с результатами, полученными в [1] методом кривой роста.

Для моделей с $T_{ef} = 6500$ К, $\lg g = 4$ из [3] нами были рассчитаны контуры, W_λ и $(\tau_0)_W$ четырех линий: Mg II λ 4481.13, Si II λ 6347.09, λ 4130.88, Sr I λ 4274.8 Å.

Кривые изменения W_λ в зависимости от содержания данного элемента в атмосфере приведены на рис. 7. Как видно из рисунка, ход зависимостей для моделей [2] и [3] примерно одинаков.

На рис. 8 приведены распределения температуры с глубиной для этих моделей — кривые сливаются как раз на тех глубинах, где и формируется линейчатый спектр. Таким образом, расчеты с моделями Пьетремана и Эдмондса должны давать близкие результаты.

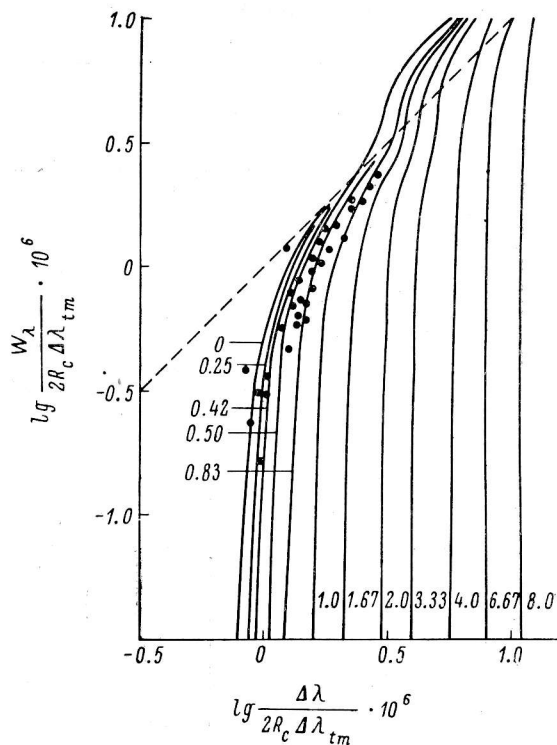


Рис. 6. Зависимость $(W_\lambda, \Delta\lambda)$ для определения макротурбулентной скорости.

Сплошными линиями нанесено семейство теоретических зависимостей для различных значений параметра v_t/v_{tm} [17]. Вдоль штриховой прямой производится смещение средней эмпирической зависимости.

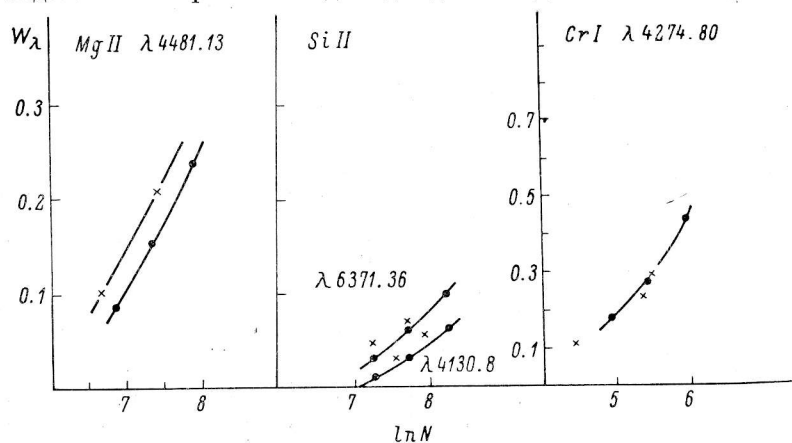


Рис. 7. Зависимость W_λ от содержания элемента.

Сплошные линии — расчеты по [3].

Определение химического состава. Уточнение химического состава Проциона проводилось следующим образом. С использованием атомных параметров создавалась сетка теоретических контуров путем варьирования

ТАБЛИЦА 3

Экспериментальные и теоретические значения эквивалентных ширин W_λ , глубин R_c , полуширин $\Delta\lambda$ и глубин образования τ_W линий для различных содержаний элемента $\lg(N_E/N_H) + 12$

Линия	Экспериментальные			Теоретические			
	W_λ	R_c	$\Delta\lambda$	W_λ	R_c	τ_W	$\lg(N_E/N_H) + 12$
Na I λ 4668.56	0.022	0.19	0.13	0.054	0.380	0.81	6.19 *
0.023				0.188	1.07	5.75 *	
0.014				0.124	1.14	5.21 *	
Mg I λ 4167.27	0.217	0.68	0.30	0.162	0.720	0.46	7.35 *
0.79				0.630	0.58	6.68 *	
Mg II λ 4481.13	0.232	0.55	—	0.211	0.610	0.38	7.35 *
0.570		—	0.103	0.481	0.58	6.68 *	
0.430		—	—	—	—	—	—
Al I λ 3944.01	0.174	0.66	0.21	0.098	0.760	0.24	5.88 *
0.060				0.648	0.77	5.21 *	
λ 3961.53	0.190	0.67	0.25	0.110	0.770	0.28	5.88 *
0.079				0.720	0.45	5.21 *	
Si I λ 3905.53	0.234	0.77	0.30	0.316	0.793	0.59	7.92 *
0.269				0.793	0.53	7.70	
0.241				0.793	0.49	7.54	
0.202				0.792	0.35	7.23 *	
Si II λ 4130.88	0.054	0.36	0.15	0.057	0.411	0.79	7.92 *
0.037				0.400	0.82	7.70	
0.031				0.361	0.88	7.54	
0.022				0.280	1.03	7.23 *	
Si II λ 4130.88	0.054	0.36	0.15	0.057	0.411	0.79	7.92
0.037				0.400	0.82	7.70	
0.031				0.361	0.88	7.54	
0.022				0.280	1.03	7.23 *	
λ 6347.09	0.107	0.37	0.25	0.073	0.410	0.23	7.70
0.048				0.320	0.35	7.23	
λ 6371.36	0.108	0.37	0.26	0.087	0.394	0.26	7.92 *
0.060				0.370	0.29	7.70 *	
0.037				0.270	0.41	7.23 *	
—				—	—	—	
Ca I λ 4226.73	0.282	0.75	0.35	0.377	0.750	0.54	7.05 *
0.218				0.750	0.39	6.39 *	
0.144				0.742	0.15	5.30	
λ 4425.44	0.134	0.70	0.20	0.177	0.717	0.18	7.05
0.122				0.709	0.24	6.39 *	
0.097				0.690	0.24	5.91 *	
0.066				0.620	0.42	5.3	
0.180				0.712	0.10	7.05	
λ 4455.89	0.153	0.69	0.20	0.134	0.710	0.11	6.39
0.109				0.700	0.25	5.91	
0.082				0.663	0.25	5.30	
0.126				0.700	0.17	7.05	
0.093				0.672	0.22	6.39	
λ 4526.94	0.090	0.46	0.19	0.069	0.615	0.35	5.91 *
0.051				0.536	0.56	5.60 *	
0.034				0.407	0.79	5.30 *	
—				—	—	—	
—				—	—	—	
—				—	—	—	
Ca II λ 3933.66	6.388	0.83	5.50	15.800	0.788	0.12	7.05
11.400				0.788	0.48	6.39	
8.990				0.788	0.60	6.08 *	
5.330				0.788	0.74	5.52 *	
—				—	—	—	

* Соответствующие теоретические контуры линий приведены на рис. 5.

Т А Б Л И Ц А 3 (продолжение)

Линия	Экспериментальные			Теоретические			
	W_{λ}	R_c	$\Delta\lambda$	W_{λ}	R_c	τ_W	$\lg(N_E/N_H) + 12$
Ti I λ 4534.78	0.115	0.56	0.19	0.141	0.700	0.07	5.33
				0.107	0.688	0.24	4.66 *
				0.077	0.645	0.29	4.00
				0.060	0.590	0.48	3.74 *
λ 4548.76	0.047	0.35	0.13	0.119	0.690	0.22	4.66
				0.040	0.460	0.74	4.00 *
				0.026	0.327	0.96	3.74 *
Ti II λ 4300.05	0.212	0.73	0.28	0.225	0.740	0.39	5.33 *
				0.157	0.737	0.21	4.66
				0.100	0.720	0.24	3.74 *
λ 4399.77	0.141	0.60	0.23	0.161	0.720	0.13	5.33
				0.114	0.720	0.26	4.66 *
				0.080	0.672	0.30	3.93
				0.068	0.638	0.45	3.74 *
λ 4488.32	0.103	0.52	0.20	0.152	0.707	0.13	5.33
				0.097	0.690	0.26	4.66
				0.061	0.588	0.49	3.93
				0.048	0.530	0.62	3.74
V II λ 4023.39	0.084	0.52	0.16	0.105	0.770	0.23	4.05
				0.074	0.720	0.51	3.39 *
				0.036	0.510	0.98	2.74 *
Cr I λ 4254.35	0.162	0.77	0.20	0.223	0.740	0.43	5.48 *
				0.203	0.740	0.39	5.35
				0.151	0.740	0.35	5.13
				0.113	0.728	0.32	4.46 *
λ 4274.80	0.172	0.74	0.22	0.254	0.740	0.50	5.48
				0.226	0.740	0.46	5.35
				0.115	0.720	0.36	4.46 *
Cr II λ 4145.77	0.045	0.34	0.10	0.032	0.461	0.85	5.48
				0.027	0.414	0.90	5.35 *
				0.022	0.230	1.24	5.13 *
				0.006	0.100	1.40	4.46
λ 4558.66	0.134	0.65	0.19	0.882	0.650	0.24	5.48 *
				0.075	0.638	0.26	5.35 *
				0.064	0.600	0.37	5.13 *
				0.029	0.390	0.77	4.46
Mn I λ 4470.14	0.039	0.31	0.13	0.076	0.650	0.28	5.10
				0.037	0.462	0.74	4.42 *
				0.020	0.288	1.01	4.04 *
				0.011	0.170	1.17	3.74
λ 4502.22	0.040	0.30	0.13	0.078	0.650	0.25	5.10
				0.040	0.481	0.70	4.42 *
				0.022	0.303	0.97	4.04 *
				0.012	0.183	1.14	3.74
λ 4754.04	0.138	0.60	0.23	0.102	0.658	0.22	5.10
				0.070	0.600	0.29	4.42
				0.048	0.502	0.53	4.04
				0.031	0.370	0.75	3.74
Fe I λ 4741.53	0.083	0.43	0.19	0.071	0.600	0.29	7.10 *
				0.051	0.525	0.49	6.78
				0.033	0.390	0.73	6.46 *
λ 4120.21	0.110	0.57	0.19	0.103	0.745	0.25	7.10
				0.088	0.706	0.23	6.78
				0.070	0.689	0.50	6.46

Линия	Экспериментальные			Теоретические			
	W_λ	R_c	$\Delta\lambda$	W_λ	R_c	τ_W	$\lg(N_E/N_H) + 12$
Fe I							
λ 4210.35	0.150	0.75	0.20	0.174 0.135 0.105	0.748 0.740 0.730	0.25 0.22 0.25	6.78 * 6.46 5.78 *
λ 4187.04	0.345	0.72 0.72	0.24 0.23	0.443 0.310 0.288	0.750 0.750 0.748	0.34 0.32 0.31	6.78 6.46 5.78
Fe II							
λ 4128.74	0.087	0.50	0.16	0.041 0.025 0.014	0.536 0.382 0.230	0.85 1.06 1.29	7.10 6.78 6.46
λ 4413.60	0.030	0.15	0.11	0.018 0.010 0.005 0.001	0.162 0.150 0.080 0.020	1.06 1.21 1.32 1.39	7.10 * 6.78 * 6.46 5.78
λ 4576.33	0.100	0.56	0.17	0.063 0.044 0.028 0.008	0.598 0.503 0.364 0.124	0.42 0.63 0.83 1.16	7.10 * 6.78 * 6.46 5.78
λ 4491.40	0.110	0.62	0.18	0.072 0.053 0.035	0.640 0.565 0.442	0.34 0.56 0.77	7.10 * 6.78 * 6.46
Sr II							
λ 4077.71	0.219	0.74	0.27	0.201 0.180 0.144	0.770 0.770 0.770	0.27 0.25 0.33	3.55 2.90 2.43
λ 4161.80	0.067	0.47	0.14	0.103 0.049 0.028	0.730 0.620 0.420	0.28 0.72 0.98	3.55 2.90 * 2.43 *
λ 4215.52	0.215	0.74	0.27	0.184 0.162 0.130	0.748 0.748 0.748	0.19 0.18 0.31	3.55 * 2.90 2.43 *
Eu II							
λ 4129.73	0.058	0.38	0.15	0.038 0.024 0.014 0.007	0.528 0.370 0.223 0.114	0.94 1.19 1.39 1.51	1.00 * 0.70 * 0.40 0.05
λ 4576.33	0.100	0.56	0.17	0.063 0.044 0.028 0.008	0.598 0.503 0.364 0.124	0.42 0.63 0.83 1.16	7.10 * 6.78 * 6.46 5.78
λ 4491.40	0.110	0.62	0.18	0.072 0.053 0.035	0.640 0.565 0.442	0.34 0.56 0.77	7.10 * 6.78 * 6.46
Sr II							
λ 4077.71	0.219	0.74	0.27	0.201 0.180 0.144	0.770 0.770 0.770	0.27 0.25 0.33	3.55 2.90 2.43
λ 4161.80	0.067	0.47	0.14	0.103 0.049 0.028	0.730 0.620 0.420	0.28 0.72 0.98	3.55 2.90 * 2.43 *
λ 4215.52	0.215	0.74	0.27	0.184 0.162 0.130	0.748 0.748 0.748	0.19 0.18 0.31	3.55 * 2.90 2.43 *
Eu II							
λ 4129.73	0.058	0.38	0.15	0.038 0.024 0.014 0.007	0.528 0.370 0.223 0.114	0.94 1.19 1.39 1.51	1.00 * 0.70 * 0.40 0.05

в определенных пределах относительного содержания данного элемента в атмосфере звезды $\lg(N_E/N_H)+12$. Ориентировочные значения содержаний химических элементов, т. е. границы сетки, взяты из [1], где они определялись грубым анализом атмосферы Проциона методом кривой роста. В табл. 3 приведены экспериментальные параметры (W_λ , R_c , $\Delta\lambda$) сорока линий и данные расчетов для сетки теоретических контуров, т. е. величины W_λ , R_c , τ_w для различных значений $\lg(N_E/N_H)+12$.

Определение действительного значения содержания химического элемента в атмосфере Проциона проводилось путем сравнения формы контуров и эквивалентных ширин (кривая роста) теоретических и наблюдаемых линий (рис. 5). Значения содержания, полученные с ориентировкой на совмещение экспериментальных и теоретических контуров, немного менее уверенные, чем полученные по эквивалентным ширинам линий. Это объясняется тем, что экспериментальные контуры слегка отличаются по форме от теоретических (причины обсуждались ранее) и в совмещении присутствует элемент произвола. Поскольку факторы, искажающие контур, не меняют эквивалентной ширины линии, то больший вес при определении содержания элемента придавался значениям, определенным по W_λ .

В табл. 4 дана сводка величин $\lg(N_E/N_H)+12$ и ошибка их определения. **Заключение.** Таким образом, получены точные сведения о содержании 12 элементов относительно водорода в атмосфере Проциона, и, следовательно, вопрос о калибровке кривой химического состава, поставленный

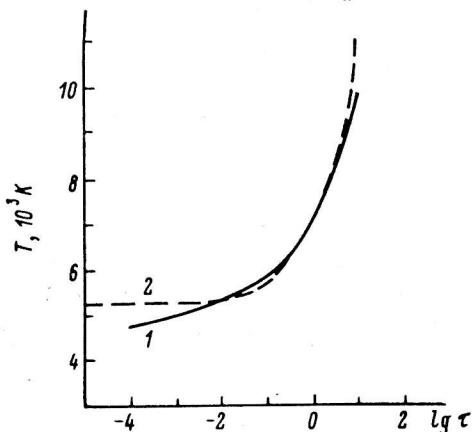


Рис. 8. Распределение температуры с глубиной.

1 — модель Эдмонда.

ТАБЛИЦА 4

Содержание химических элементов и ошибки их определения

Элемент	$\lg \frac{N_E}{N_H} + 12$	$\pm \Delta \lg \frac{N_E}{N_H}$	Элемент	$\lg \frac{N_E}{N_H} + 12$	$\pm \Delta \lg \frac{N_E}{N_H}$	Элемент	$\lg \frac{N_E}{N_H} + 12$	$\pm \Delta \lg \frac{N_E}{N_H}$
H	12.00	—	Cu	3.95	0.7	Sm	2.19	0.3
He	10.70	—	Zn	3.39	0.3	Eu	0.90	0.3
Li	< 1.60	0.5	Ga	2.05	0.4	Gd	1.71	0.3
Be	2.93	0.5	Sr	2.80	0.2	Tb	1.05	0.5
C	8.68	0.6	Y	2.76	0.1	Dy	1.55	0.5
N	8.76	0.1	Zr	2.66	0.2	Er	1.55	0.3
O	9.56	0.4	Nb	2.45	0.5	Tm	0.80	0.3
Na	5.76	0.1	Mo	2.48	0.2	Yb	2.47	0.3
Mg	7.40	0.2	Ru	2.08	0.2	Lu	1.38	0.6
Al	6.70	0.4	Rh	2.02	0.6	Hf	1.65	0.7
Si	7.72	0.1	Pd	2.38	0.4	Ta	2.68	0.5
S	7.28	0.1	Ag	1.95	0.7	W	1.77	0.7
K	5.24	0.3	Cd	1.74	0.5	Os	1.32	0.7
Ca	6.10	0.3	In	1.85	0.5	Ir	1.49	0.6
Sc	3.40	0.1	Sn	2.53	0.5	Pt	2.26	0.5
Ti	4.50	0.3	Sb	2.80	0.5	Au	2.77	0.3
V	3.65	0.4	Cs	3.52	0.7	Hg	1.75	0.3
Cr	5.45	0.1	Ba	2.57	0.5	Tl	1.75	0.5
Mn	4.45	0.1	La	2.33	0.3	Pb	2.05	0.7
Fe	7.30	0.2	Ce	2.37	0.3	Bi	1.84	0.2
Co	4.50	0.1	Pr	1.81	0.5	U	0.88	0.7
Ni	5.38	0.1	Nb	2.39	0.5			

в работе [1], решен. Теперь можно определить положение на графике (см. рис. 5 в работе [1]) кривой химического состава для 64 элементов, т. е. определить содержание каждого из этих элементов относительно водорода. Результат этой операции представлен на рис. 9. Из него видно, что химический состав Прозиона в основном близок к солнечному. Со-

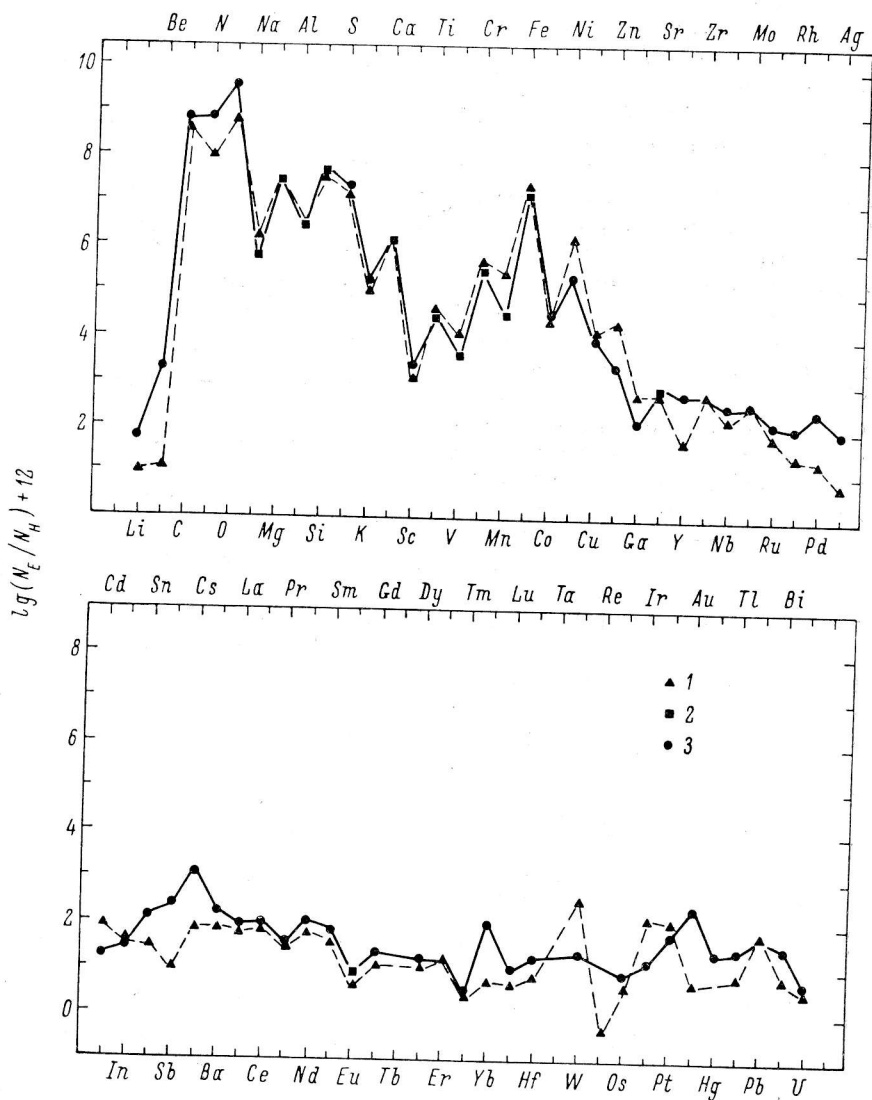


Рис. 9. Сравнение химического состава Солнца и Прозиона.
1 — Солнце, 2, 3 — Прозион (2 — определения методом моделей атмосфер, 3 — методом кривой роста [1]).

держание несколько большее солнечного наблюдается у N и O (однако, возможно, это следствие малой точности определения W_λ , так как линии этих элементов в спектре Прозиона очень слабы), а Na и элементы группы железа (V, Mn, Ni, Zn, Ca) обнаруживают дефицит (от 0.4 до 1.0 в логарифме в зависимости от элемента).

Ошибка определения содержания атомов, входящих в табл. 4, обусловлена различными факторами, из которых главные: 1) ошибки параметров линий; 2) ошибки измерений; 3) ошибки метода счета.

Ошибки, обусловленные первой группой факторов, вероятно, самые существенные и, что очень неприятно, наиболее трудно устранимые. Неуверенность в задании атомных параметров (силы осцилляторов, чувствительность к эффектам давления) накладывает ограничение на точность определения химического состава в пределах $\pm 0.1 \div 0.3$ в логарифме числа атомов. Это существенно больше того, что дают ошибки измерения [1] (второй фактор). То же можно сказать и об ошибках метода счета (третий фактор).

Для элементов, обилие которых определялось только в первой работе [1], ошибка в среднем составляет ± 0.45 в логарифме числа атомов и обусловлена средней ошибкой классического метода кривой роста. В нашем случае эта цифра подтверждается сравнением результатов для элементов из табл. 4 и 5 по первоначальному определению [1] и окончательному (табл. 4).

В заключение можно сказать, что существенный прогресс в этой области можно ожидать только для элементов со слабыми линиями либо для тех, которые вообще в видимой области не имеют линий. Что же касается расчетов с использованием более «точных» моделей, то, так как неопределенность в задании атомных параметров вносит основную ошибку в определение химического состава, замена моделей [2] моделями [3] не должна существенно изменить выводы, сделанные в работе.

Авторы считают приятным долгом поблагодарить Л. И. Снежко, О. А. Зенину, И. А. Зенину за всестороннюю помощь при выполнении этой работы.

Список литературы

1. Зенина И. А., Зенина О. А., Леушин В. В. Химический состав Прокциона. Грубый анализ. — *Астрофиз. исслед.* (Изв. САО), 1976, 8, с. 25—40.
2. Edmonds F. N. A set of non-gray model atmospheres for Procyon. — *Astrophys. J.*, 1964, 140, No 3, p. 902—920.
3. Reutemann E. Line blanketing and model stellar atmospheres. III. Tables of models and broad-band colors. — *Astrophys. Suppl.*, 1974, 18, p. 81—133.
4. Харитонов А. В., Терещенко В. М., Глушкова Е. А., Ребристый В. Т., Фришберг Л. Д. Спектрофотометрия А- и F-звезд. Алма-Ата, «Наука», 1974. 224 с.
5. Копылов И. М. Электронные плотности в атмосферах горячих звезд. — *Изв. КрАО*, 1961, 26, с. 232—236.
6. Корлис Ч., Бозман У. Вероятности переходов и силы осцилляторов 70 элементов. Пер. с англ. М., «Мир», 1968. 562 с.
7. Касабов Г. А., Елисеев В. В. Спектроскопические таблицы для низкотемпературной плазмы. М., Атомиздат, 1973. 160 с.
8. Грим Г. Спектроскопия плазмы. М., Атомиздат, 1969. 452 с.
9. Ross J. E., Aller L. H. The manganese star iota coronae Borealis. — *Astrophys. J.*, 1970, 161, No 1, p. 189—197.
10. Jager C. de, Nevel L. Spectroscopic data to 50 model photospheres. — *Ann. Obs. Royal de Belgique*, 1957, 8, p. 85.
11. Aller L. H. *The Atmospheres of the Sun and Stars*. New York, 1965. 350 p.
12. Drawin H. W., Felenbok P. Data for plasmas in local thermodynamic equilibrium. Paris, Jauthier-Villars, 1965. 280 p.
13. Margo F. A., Everett C. H. M. Polynomial approximation of partition functions for rare-earth elements. — *Astrophys. J.*, 1972, 172, No 2, p. 447—450.
14. Снежко Л. И. К методике расчета контуров линий поглощения. — *Сообщ. САО*, 1971, 3, с. 3—16.
15. Копылов И. М., Стещенко Н. В. Звездный спектрограф с эшелле. — *Изв. КрАО*, 1965, 33, с. 308—312.
16. Боярчук А. А., Копылов И. М. Сводный каталог скоростей вращения 2558 звезд. — *Изв. КрАО*, 1964, 31, с. 442—498.
17. Van den Neuvcl E. P. J. The method of linewidth correlation, refined and applied. — *Bull. Astron. Inst. Netherlands*, 1963, 17, No 2, p. 148—160.