

## О СОДЕРЖАНИИ ЖЕЛЕЗА И ТИТАНА В АТМОСФЕРАХ ХИМИЧЕСКИ ПЕКУЛЯРНЫХ ЗВЕЗД

И. М. Копылов

По эквивалентным ширинам  $W_\lambda$  избранных линий FeII и TiII определены индексы пекулярности  $P$  (Fe II) и  $P$  (Ti II) для 70 нормальных звезд B8—A8 классов светимости III—V и для 95 магнитных, химически пекулярных (CP) спектральных классов B3—A8.

Для нормальных звезд значения индексов  $P$  (FeII) и  $P$  (TiII) лежат в пределах 0.5—1.7. Обнаружена тесная корреляция между  $P$  (FeII) и  $P$  (TiII). Установлен характер зависимости индексов  $P$  (FeII) и  $P$  (TiII) от обилия железа и титана [ $\lg \epsilon$  (Fe) и  $\lg \epsilon$  (TiII)], полученного методом моделей атмосфер. Таким образом, индексы  $P$  могут использоваться для быстрого определения содержания химических элементов в атмосферах B- и A-звезд.

Из анализа зависимостей  $P$  (FeII) и  $P$  (TiII) от спектрального класса ( $T_e$ ), типа пекулярности и величины магнитного поля  $\langle B_e \rangle$  для CP-звезд следует:

а) индексы  $P$  (FeII) и  $P$  (TiII) быстро возрастают с ростом температуры от «нормальных» значений  $P \approx 0.5 \div 1.7$  для самых поздних, (Sr, Cr, Eu)-звезд ( $S_p \approx A3-A8$ ,  $8700 \geq T_e \geq 7500$  K), достигая значений от  $\geq 2$  до 10—13 для горячих (He-weak), Si4200 и Hg, Mn-звезд ( $S_p \approx B3-B8$ ,  $18000 \geq T_e \geq 12000$  K);

б) избыток обилия Fe и Ti в атмосферах (в среднем по поверхности) CP-звезд типа He-weak, Si, Si4200 и, возможно, Hg, Mn может достигать 2.7 dex;

в) звезды He-weak; Si, Si4200 с резко усиленными линиями металлов Fe, Ti, Cr и т. д. с  $P$  (FeII) +  $P$  (TiII) / 2  $\geq 4$  имеют в 2 раза большее  $\langle B_e \rangle$ , чем остальные типы CP-звезд в этом же интервале спектральных классов, B3—B8: для них  $\langle B_e \rangle \approx 2000$  Гс, для остальных (Si, He-weak) звезд  $\langle B_e \rangle = 1000$  Гс, для Hg, Mn-звезд  $\langle B_e \rangle = 420$  Гс.

From the equivalent widths  $W_\lambda$  of the selected FeII and TiII lines the peculiarity indices  $P$  (FeII) and  $P$  (TiII) are determined for 70 normal B8—A8 stars of III—V luminosity classes and for 95 magnetic chemically peculiar (CP) B3—A8 stars.

For normal stars all the  $P$  (FeII) and  $P$  (TiII) indices are within the limits of 0.5—1.7. A close correlation of  $P$  (FeII) and  $P$  (TiII) is found. The dependence character of  $P$  (FeII) and  $P$  (TiII) indices on the iron titanium abundance  $\lg \epsilon$  (Fe) and  $\lg \epsilon$  (TiII), determined using the model atmosphere method, is ascertained, i. e.  $P$  indices can be used for prompt determination of relative chemical abundance in the atmospheres of B- and A-stars.

Analysing the dependence of  $P$  (FeII) and  $P$  (TiII) on the spectral class (or  $T_e$ ) peculiarity type and magnetic field  $\langle B_e \rangle$  for CP-stars it follows:

а)  $P$  (FeII) and  $P$  (TiII) indices increase promptly with the temperature increase from the «normal» values  $P \approx 0.5 \div 1.7$  for the latest (Sr, Cr, Eu) stars ( $S_p \approx A3-A8$ ,  $8700 \geq T_e \geq 7500$  K). They approach the values from  $\geq 2$  to 10—13 for the hot He-weak, Si4200 and Hg, Mn-stars ( $S_p \approx B3-B8$ ,  $18000 \geq T_e \geq 12000$  K);

б) Fe and Ti overabundances in the atmospheres (on the surface on the average) of CP-stars of He-weak, Si, Si4200 and, perhaps, Hg, Mn types can approach 2.7 dex;

в) He-weak, Si, Si4200 stars with the substantially strengthened Fe, Ti, Cr etc. metal lines with  $P$  (FeII) +  $P$  (TiII) / 2  $\geq 4$  have two times larger  $\langle B_e \rangle$  than CP-stars of the other peculiarity types within the same interval of spectral classes, B3—B8: for them  $\langle B_e \rangle = 2000$  Gs, for the other (Si, He-weak) stars  $\langle B_e \rangle = 1000$  Gs, for Hg, Mn stars  $\langle B_e \rangle = 420$  Gs.

**1. Постановка задачи.** Хорошо известно, что в находимом спектроскопически содержании металлов (например, группы железа) в атмосферах нормальных (стандартных) звезд спектральных классов B—F обнаруживается значительная дисперсия, обусловленная в совокупности ошибками в использованном спектральном материале ( $W_\lambda$ ), несовершенством современных методов определения химического состава, неточностями в определении или задании необходимых для анализа исходных фундаментальных характеристик звезд ( $T_e$  и  $\lg g$ )

и реальными вариациями обилия химических элементов даже среди звезд близких возрастов, например среди звезд одного и того же скопления.

Ошибки экспериментального и методического характера могут быть существенно уменьшены за счет получения и аккуратной обработки однородного спектрального материала с достаточно высоким спектральным разрешением, за счет использования современных однородных сеток моделей звездных атмосфер и, наконец, за счет критического подбора и применения методов нахождения  $T_e$  и  $\lg g$ . Подобные пути уменьшения ошибок определения химического состава атмосфер звезд в последнее время рассмотрены и использованы, например, в работах [1, 2]. Дальнейшее повышение точности позволит приблизиться к еще более надежному определению и анализу реальных различий в содержании химических элементов в атмосферах нормальных звезд в зависимости от их возраста и места рождения в Галактике, что имеет немаловажное значение для решения проблем звездообразования, содержания химических элементов в звездах и межзвездной среде и химической эволюции галактик.

Однако несравненно более сложной и далекой от своего разрешения является задача определения содержания химических элементов в атмосферах химически пекулярных (CP) звезд. Сложность этой задачи обусловлена двумя основными взаимно связанными обстоятельствами: наличием в атмосферах CP-звезд сильных магнитных полей, несомненно влияющих на структуру атмосферы и процесс формирования спектральных линий, и крайней неоднородностью в распределении элементов по поверхности звезды и, возможно, по глубине в атмосфере.

Сильное магнитное поле вне зависимости от сложности его структуры влияет на строение атмосферы, особенно ее верхних слоев, на распределение элементов по поверхности и по глубине (гипотезы горизонтальной и вертикальной диффузии [3, 4]) и на механизм образования спектральных линий (магнитное усиление [5, 6]). Крайняя неравномерность распределения элементов по поверхности CP-звезд (пятнистость) делает обычные методы точного анализа химического состава атмосфер (кривая роста, применение моделей) практически мало пригодными, а результаты — не внушающими достаточного доверия [7, 8]. Конечно, большой избыток или дефицит обилия тех или иных элементов в атмосферах CP-звезд (в среднем по поверхности), находимые упомянутыми традиционными методами, являются скорее всего реальными, но значительный разброс в результатах, получаемых разными авторами для одной и той же звезды, свидетельствует о том, что до получения достоверных численных данных еще далеко. Между тем проблема происхождения и природы химических аномалий и магнитных полей у CP-звезд является одной из узловых в современной астрофизике и звездной космогонии. Поэтому разработка и применение косвенных, дифференциальных или опосредствованных, но количественных методов оценки химических аномалий у CP-звезд являются настоятельно необходимыми, особенно если такие методы создают предпосылки для массового определения и сравнения химического состава у CP-звезд различных типов пекулярности и разного возраста.

Одним из таких эффективных и многообещающих методов оценки химического состава CP-звезд является определение количественных индексов пекулярности спектров, а следовательно, и атмосфер CP-звезд [9, 10]. Использование подобных методов диктуется еще и тем обстоятельством, что набор общепринятых типов пекулярности, чаще всего оцениваемых качественно, оказывается совершенно недостаточным для описания всего многообразия и всех особенностей спектров CP-звезд. К давно установленным и, казалось бы, основным типам пекулярности Bp- и Ap-звезд, таким как «Sr, Cr, Eu», «Si, Si $\lambda$ 4200», «Hg, Mn», за последние 10—15 лет добавились новые, не менее важные по своей физической природе, появление которых значительно раздвинуло температурные границы класса и самого понятия «химически пекулярные звезды» и одновременно усложнило решение задач, связанных с пониманием происхождения и взаимосвязи химических аномалий и магнитного поля. Здесь в первую очередь имеется в виду введение типов пекулярности He-weak и He-rich, существенно расширивших область главной последовательности, занимаемую Bp- и Ap-звездами, в сторону значительно более высоких температур, вплоть до

$T_e \approx 30\,000 \div 35\,000$  К. Выявление CNO-аномалий в атмосферах O и ранних B-звезд подтвердило обоснованность этого сдвига высокотемпературной границы области CP-звезд. Кроме того, постепенно установилось впервые отмеченное в [11] понятие еще об одном конкретном типе пекулярности, о так называемых CP-звездах с усиленными линиями металлов (metal-rich). В спектрах таких звезд при довольно высоких  $T_e$ , порядка 18 000—12 000 К, свойственных звездам спектральных классов B3—B8, и при наличии привычных для таких температур типов пекулярности He-weak, Si, Si  $\lambda 4200$  или Hg, Mn, чрезвычайно богато представлены линии ионов металлов, таких как FeII, FeIII, TiII, CrII, VII и т. д., причем очень часто с интенсивностями, характерными как для пекулярных, так и для нормальных звезд со значительно более низкими температурами ( $10\,000 \geq T_e \geq 8300$  К и  $Sp$  от B9—A0 до A4—A5).

Хорошо установленным считается сейчас также следующий факт, дополняющий и подтверждающий только что сказанное. Спектральные классы (температуры) CP-звезд, определяемые количественным методом по интенсивностям ( $W_\lambda$ ) линий ионов FeII, TiII и других металлов или визуальным сравнением со спектрами стандартных звезд в системе МК, оказываются систематически более поздними, чем спектральные классы (температуры), находимые по распределению энергии в спектрах или по показателям цвета, например, в системе  $UBV$  [10, 12, 13]. При этом систематическое расхождение спектров, разница  $Sp$  (Fe, Ti)— $Sp$  (B—V)<sub>0</sub>, обнаруживается только у CP-звезд, более ранних, чем A0, быстро растет с переходом к еще более ранним звездам и достигает для самых горячих (He-weak), Si4200-звезд половины спектрального класса:  $Sp$  (B—V)<sub>0</sub>  $\approx$  B3—B4,  $Sp$  (Fe, Ti)  $\approx$  B8—A0 (подробности см. в табл. 3 в [10]).

Изложенные выше данные свидетельствуют о том, что железо, титан и, возможно, ванадий следует рассматривать как металлы с аномальным обилием в атмосферах CP-звезд. Распределение Fe, Ti, V по поверхности пекулярных звезд также является существенно неоднородным [7, 14—16].

Задачей данной работы является количественный анализ интенсивностей избранных линий FeII и TiII в спектрах большого числа CP-звезд с целью выяснить, насколько у последних линии FeII и TiII усилены (или ослаблены) по сравнению с нормальными звездами таких же спектральных классов ( $T_e$ ) и насколько обилие этих элементов в атмосферах CP-звезд (в среднем по поверхности) отличается от нормального.

**2. Индексы пекулярности и обилие железа и титана у нормальных B- и A-звезд.** Метод определения индексов пекулярности, их ошибок, спектральных классов и  $T_e$  для пекулярных B- и A-звезд подробно изложен в [10]. Там же дается описание использованного для этих целей спектрального материала. Для определения индексов пекулярности железа и титана у нормальных звезд спектральных классов B и A были взяты дополнительно результаты измерения  $W_\lambda$  избранных линий FeII и TiII у 21 звезды спектральных классов B9—A7 классов светимости III—V, принадлежащей семи рассеянными скоплениям разного возраста [2]. По температурам  $T_e$  для этих звезд [2] нами были определены спектральные классы по методике, описанной в [10]. Для этих звезд в [2] методом моделей атмосфер определены обилия  $\lg \epsilon$  (Fe),  $\lg \epsilon$  (TiII). Для 50 звезд B8—A7 величины  $W_\lambda$  линий FeII и TiII, сведенные к «стандартной» системе [17—19], взяты из [17, 19], а спектральные классы, определенные методом количественной спектральной классификации, — из [20]. Средняя квадратичная ошибка спектрального класса звезд из [20] составляет в среднем  $\pm 0.22$  спектрального подкласса.

В табл. 1 приведены длины волн линий FeII и TiII, по которым определялись индексы пекулярности, с указанием номера мультиплета и реальных или возможных бленд. Степень блендирования избранных линий в основном обусловлена дисперсией спектрограмм и скоростью вращения звезды.

На рис. 1 представлена для 70 нормальных звезд зависимость суммы  $W_\lambda$  линий TiII из табл. 1 от спектрального класса. Линией показан средний ход зависимости для звезд B8—A7. Метод экстраполяции средней зависимости  $\epsilon W_\lambda$ ,  $Sp$  на интервал спектральных классов B3—B8 будет пояснен в § 3. Индекс пекулярности  $P$  (TiII) для каждой звезды с ее  $Sp$  есть (по определению [10]) отношение  $\Sigma W_\lambda$  линий TiII в ее спектре к значению  $\overline{\Sigma W_\lambda}$  на средней кривой

ТАБЛИЦА 1

Элемент	Длина волны и мультиплет	Возможные бленды
FeII	4173.45 (27)	TiII 4171.90 (105), CrII 4171.92 (18), Cr 4172.60 (18), TiII 4173.05 (96)
	4178.86 (28)	VII 4178.39 (25), VII 4179.06 (19), CrII 4179.43 (26)
TiII	4290.22 (41)	VII 4288.78 (17), MnII 4292.25 (6)
	4300.05 (41)	MnII 4300.20 (6), VII 4301.13 (225)
	4301.93 (41)	VII 4301.13 (225), FeII 4303.17 (27)

для того же спектрального класса. Аналогичным путем находились и индексы  $P$  (FeII).

Корреляция индексов  $P$  (FeII) и  $P$  (TiII) показана на рис. 2 для трех интервалов спектральных классов. Учитывая ошибки определения  $P$  ( $\sigma_P \approx 20-25\%$ ) [10], можно говорить о довольно тесной зависимости между  $P$  (FeII) и  $P$  (TiII) для нормальных В- и А-звезд, причем значения  $P$  для обоих ионов

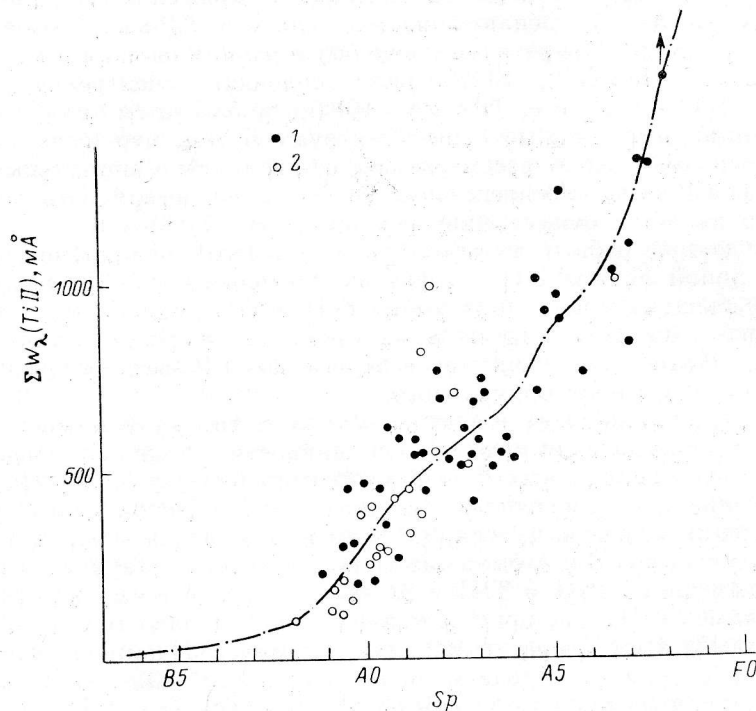


Рис. 1. Зависимость суммы  $W_\lambda$  линий TiII  $\lambda$  4290.22, 4300.05 и 4301.93 от спектрального класса для нормальных звезд.

1 —  $W_\lambda$  взяты из работ [17, 19]; 2 —  $W_\lambda$  из [2].

лежат в пределах 0.6—1.7 (точкой с  $P$ ,  $P \approx 0.35$  на рис. 2,  $\nu$  обозначена звезда 95Leo типа  $\lambda B_{00}$ ). Таким образом, для нормальных звезд В и А в узких интервалах  $T_e$  индексы  $P$  для железа и титана могут изменяться в 2.5—3 раза. Эти изменения являются отражением вариаций обилия железа и титана от звезды к звезде, что убедительно подтверждается рассмотрением рис. 3. Данные об обилии железа и титана,  $\lg \epsilon$  (Fe) и  $\lg \epsilon$  (TiII), для построения рис. 3 взяты из [2]. Разброс точек на рис. 3 полностью обусловлен ошибками определения  $P$  и  $\lg \epsilon$  (см. [10] и [2]), средние значения которых показаны на рис. 3, б.

На рис. 3, а полному диапазону изменения обилия Fe в 10—12 раз соответствуют изменения  $P$  (FeII) в среднем в 2.5—3 раза. Меньшие изменения  $P$

есть следствие эффекта насыщенности линий, которое, естественно, учитывается в процессе определения  $\lg \epsilon(\text{Fe})$ , но проявляется в относительном сужении диапазона изменений  $P$ . Легко подсчитать, что с учетом ошибок определения по величине индекса  $P(\text{FeII})$  для фиксированной  $T_e$  можно оценивать относительное обилие железа  $\lg \epsilon(\text{Fe})$  в звездах В и А с ошибкой порядка  $0.15-0.20$  dex при значениях  $P(\text{FeII}) \approx 1.3-1.7$  и  $0.20-0.25$  dex при  $P(\text{FeII}) \approx 0.5-0.7$ .

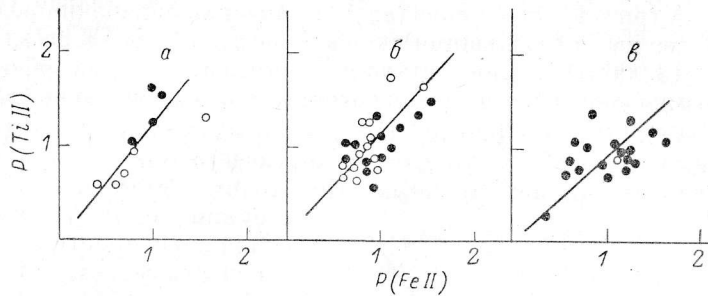


Рис. 2. Зависимости индексов пекулярности  $P(\text{FeII})$  и  $P(\text{TiII})$ .

а — для диапазона спектральных классов В8—А0; б — для А0—А3; в — для А3—А8. Обозначения звезд те же, что и на рис. 1.

0.6. Заметим, что средняя квадратичная ошибка определения  $\lg \epsilon(\text{Fe})$  по моделям атмосфер для одной звезды на рис. 3, а равна  $0.10-0.15$  dex [2].

Все сказанное в равной мере применимо к титану. Большой диапазон изменений  $\lg \epsilon(\text{TiII})$  у рассматриваемых нормальных звезд ( $\Delta \lg \epsilon \approx 1.43$ ) по сравнению с  $\Delta \lg \epsilon(\text{Fe}) = 1.06$  обусловлен тем, что в [2] определено именно содержание  $\text{TiII}$ , т. е. не учтена степень ионизации. После пересчета  $\lg \epsilon(\text{TiII})$

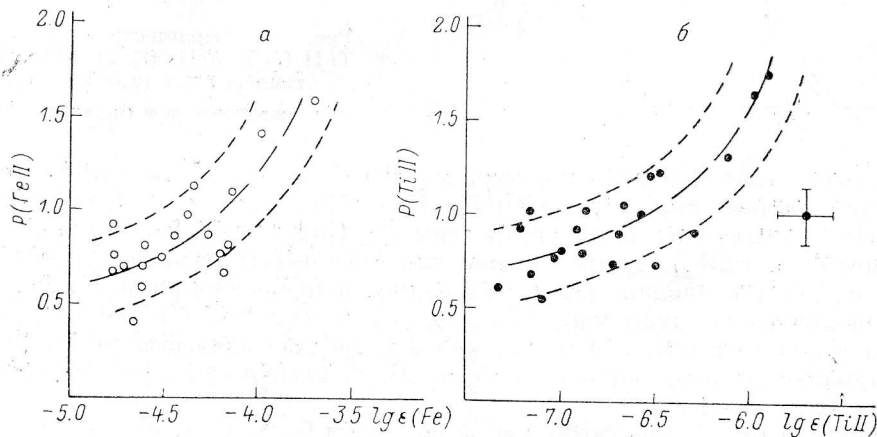


Рис. 3. Зависимость  $P(\text{FeII})$  от обилия железа  $\lg \epsilon(\text{Fe})$  [2] (а) и  $P(\text{TiII})$  от обилия титана  $\lg \epsilon(\text{TiII})$  [2] (б).

На рис. 3, б справа указаны ошибки определения  $\pm \sigma(P)$  и  $\pm \sigma(\lg \epsilon)$  по [10] и [2].

в  $\lg \epsilon(\text{Ti})$  (для изученных звезд  $12\,000 \geq T_e \geq 8000$  К) имеем  $\Delta \lg \epsilon(\text{Ti}) = 1.09$ , т. е. практически то же самое, что и для железа.

Таким образом, из изложенного следует:

а) Изменение индексов пекулярности  $P(\text{FeII})$  и  $P(\text{TiII})$  в заданном достаточно узком диапазоне  $T_e$  для нормальных звезд В и А в пределах  $0.6-1.7$  есть следствие реальных вариаций обилия Fe и Ti в атмосферах этих звезд.

б) Индексы  $P$  могут быть использованы после соответствующей калибровки по нормальным звездам с известными  $\lg \epsilon$ , для быстрого определения обилия химических элементов с ошибкой порядка  $0.2$  dex. Величина этой ошибки зависит от количества неблендированных линий, отобранных для нахождения индекса  $P$ , точности определения  $W_\lambda$  и положения линий на кривой роста.

Естественно, что остаются в силе требования надежности определения  $T_e$  для «опорных» и изучаемых звезд.

**3. Индексы пекулярности  $P$  (FeII) и  $P$  (TiII) для химически пекулярных звезд.** Задача здесь несколько осложнена тем обстоятельством, что у нормальных звезд А и В главной последовательности линии FeII и TiII быстро слабеют с ростом температуры и уже у звезд В8 ( $T_e \approx 12\,000$  К) достигают значений  $W_\lambda \leq 30 \div 50$  мА (рис. 4), что приводит к увеличению ошибок определения  $W_\lambda$ , особенно в случае звезд с большими скоростями вращения. У звезд В7 и более ранних ( $T_e \geq 13\,000$  К) линии металлов достигают предела обнаружимости в шумах фотоэмульсии даже на спектрограммах с относительно высоким разрешением,  $\delta\lambda \approx 0.2 \div 0.3$  Å. Поэтому построение надежной нормальной наблюдаемой зависимости  $\Sigma W_\lambda$  от  $Sp$  для последующего определения индексов  $P$  становится практически невозможным. Необходимо было выбрать метод разумной экстраполяции нормальной зависимости  $\Sigma W_\lambda$  от  $T_e$  на область В-звезд с  $T_e \geq 12\,000$  К.

Поскольку в звездных атмосферах количество атомов (ионов), создающих ту или иную линию поглощения, определяется (при заданных  $\lg g$  и химическом составе) формулами Саха и Больцмана, мы аппроксимировали эмпирические зависимости  $\Sigma W_\lambda$  от  $T_e$  для линий FeII и TiII типа пред-

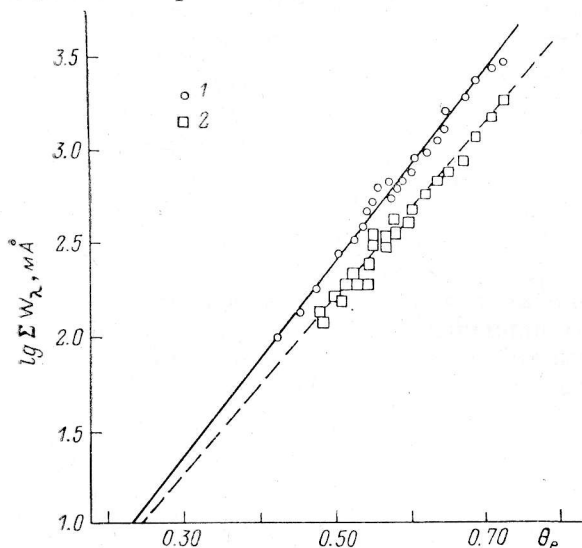


Рис. 4. Зависимости  $\lg \Sigma W_\lambda$  для TiII (1) и FeII (2) от эффективной температуры ( $\theta_e = 5040/T_e$ ).

Дополнительные пояснения см. в тексте.

ставленных на рис. 1 линейными выражениями вида  $\lg(\Sigma W_\lambda) = a + b\theta_e$ , где  $\theta_e$  имеет свой обычный смысл ( $\theta_e = 5040/T_e$ ). По снятым со средних кривых (рис. 1 для TiII) значениям  $Sp$  были определены  $T_e$ . Полученный ход эмпирических зависимостей  $\lg(\Sigma W_\lambda)$ ,  $\theta_e$  представлен для FeII и TiII разными значками на рис. 4, из которого видно, что эти зависимости прекрасно аппроксимируются прямыми линиями в диапазоне  $0.73 \geq \theta_e \geq 0.45$  ( $F2 \geq Sp \geq B8$ ). Это позволяет достаточно уверенно экстраполировать средние зависимости  $\lg \Sigma W_\lambda$ ,  $\theta_e$  для нормальных звезд вплоть до  $\theta_e = 0.25 \div 0.30$  ( $Sp = B3 - B4$ ), с ошибкой  $\Sigma W_\lambda$  не более 10–15 %.

Штрихпунктирная кривая на рис. 1 для звезд более горячих, чем В8, представляет собой численно преобразованную прямую на рис. 4 для линий TiII. Экстраполяция зависимости  $\Sigma W_\lambda$ ,  $Sp$  для линий FeII на область звезд В8–В3 выполнена аналогичным образом.

Далее, для тех СР-звезд из [10], в которых были обнаружены и измерены линии FeII и TiII из табл. 1, найдены индексы пекулярности  $P$  (FeII) и  $P$  (TiII). Таких СР-звезд оказалось 95.

На рис. 5, а и б представлены соответственно зависимости  $P$  (FeII) и  $P$  (TiII) от спектрального класса для СР-звезд разных типов пекулярности. Штриховыми кривыми на рис. 5 обозначены границы отклонений пекулярностей  $P$  от  $P=1$  для стандартных звезд так, как они определены по графикам типа рис. 2. Положение этих границ, естественно, никак не исправлялось за ошибки в определении  $W_\lambda$  и соответственно  $P$ , так как с такими же ошибками определяются  $W_\lambda$  и  $P$  для СР-звезд. Обозначением 1 на рис. 5 нанесены СР-звезды со слабо выраженными пекулярностями («нормальные» СР-звезды), а именно те, у которых для всех аномальных элементов (2–5) индексы  $P$  лежат в пределах ах границ вариаций  $P$  для стандартных звезд (см. [10], табл. 4 и рис. 4, 5).

Из анализа рис. 5 можно сделать следующие выводы.

а) Для наиболее холодных CP-звезд  $Sp=A2(A3)-A7(A8)$ ,  $T_e \leq 8800$  К индексы  $P(FeII)$  и  $P(TiII)$  находятся в пределах «нормы», таким образом, следует считать, что содержание Fe и Ti в атмосферах этих CP-звезд (среднее по поверхности) не отличается от такового для нормальных A-звезд.

б) В интервале спектральных классов  $B7-A2$  ( $13\,000 \geq T_e \geq 8800$  К) при наличии значительного количества (до  $\sim 50\%$ ) CP-звезд (всех типов пеку-

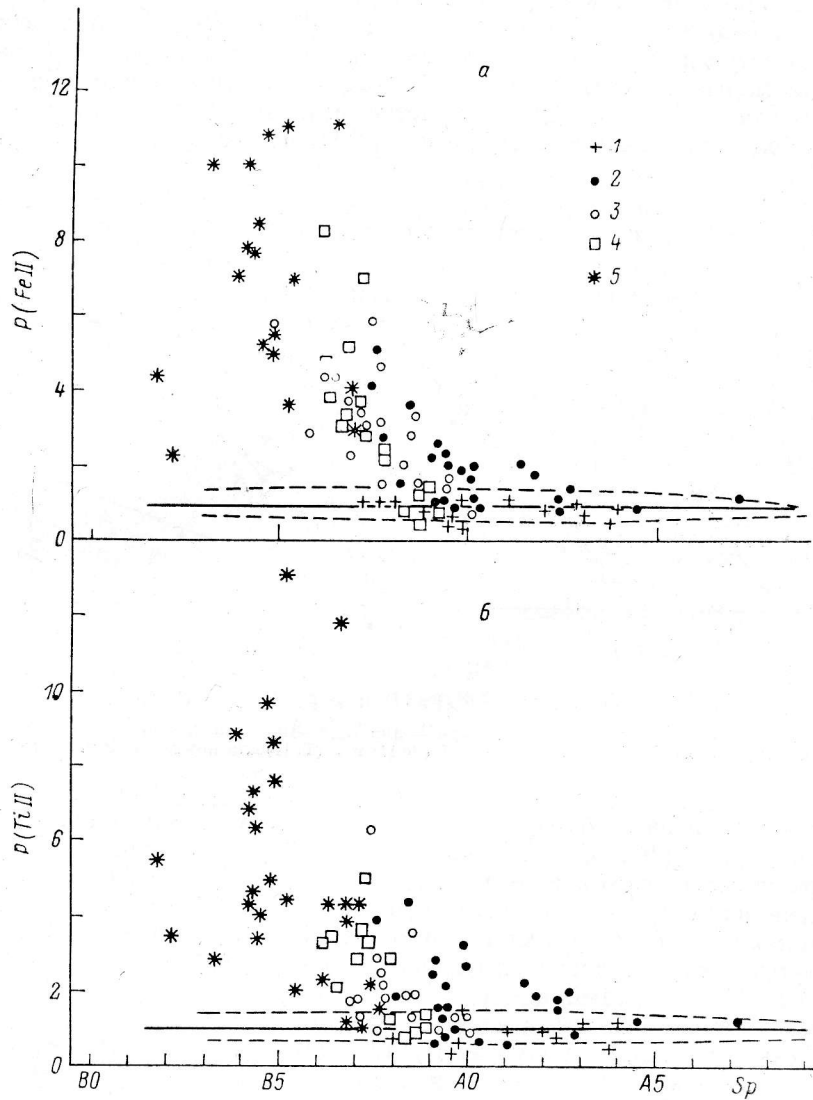


Рис. 5. Зависимости  $P(FeII)$  (а) и  $P(TiII)$  (б) от спектрального класса для CP-звезд различных типов пекулярности.

1 — слабо выраженные («нормальные») CP-звезды (подробности см. в тексте); 2 — звезды Sr, Cr, Eu; 3 — Si, Si  $\lambda$  4200; 4 — Hg, Mn; 5 — He-weak. Штриховые кривые — границы изменения  $P$  для нормальных звезд.

лярности) с «нормальными» значениями  $P(FeII)$  и  $P(TiII)$  имеется определенная тенденция к быстрому росту значений  $P(FeII)$  и  $P(TiII)$  в среднем. Максимальные величины  $P(FeII)$  и  $P(TiII)$  у CP-звезд со спектральными классами  $B7-B8$  достигают значений 5–7, одинаково больших для типов пекулярности (Sr, Cr, Eu), Si и Hg, Mn.

в) Максимальных значений, до 10–13, величины  $P(FeII)$  и  $P(TiII)$  достигают в интервале  $B3-B7$ , где основными типами пекулярности являются He-weak, Si  $\lambda$  4200 и Hg, Mn. Индексы  $P(FeII)$  и  $P(TiII)$  особенно велики (в сред-

нем) для CP-звезд, у которых наиболее выразительным типом пекулярности чаще всего является «He-weak», реже — Si<sub>4200</sub> или Hg, Mn. Таким образом, мы здесь имеем дело с типом пекулярности, впервые выделенном в [41], — типом «CP-звезд с усиленными линиями металлов».

Наконец, интересно было установить, как и в случае нормальных звезд, насколько хорошо коррелируют значения  $P(\text{FeII})$  и  $P(\text{TiII})$ . Зависимости  $P(\text{FeII})$ ,  $P(\text{TiII})$  для CP-звезд в графической форме представлены на рис. 6 для трех интервалов температур (спектральных классов).

Из рис. 6 видно, что корреляция величин  $P(\text{FeII})$  и  $P(\text{TiII})$  прослеживается достаточно четко для CP-звезд всех температур. Видно также, что эта корреляция при малых значениях  $P$  ( $P \leq 1.7 \div 1.8$ ) по существу подобна таковой у нормальных звезд (рис. 2) и является прямым продолжением последней в область больших значений  $P(\text{FeII})$  и  $P(\text{TiII})$  вплоть до  $P \approx 10 \div 13$ . Возмож-

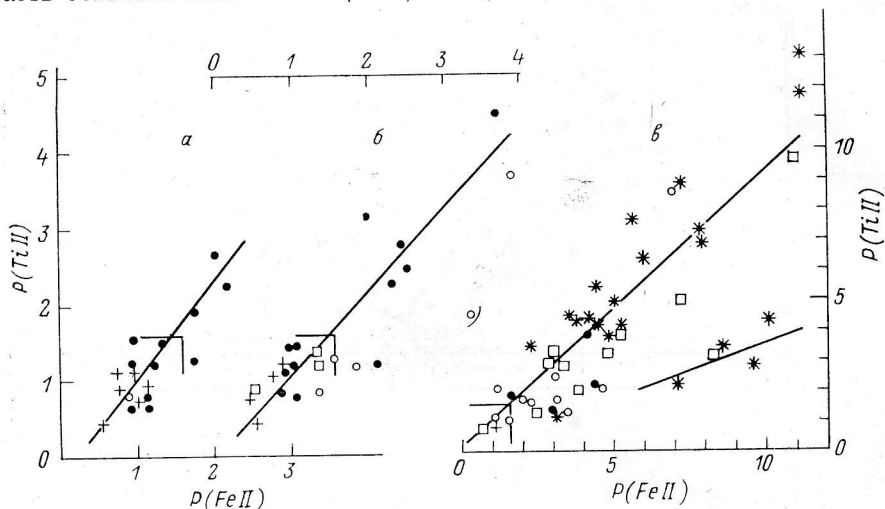


Рис. 6. Зависимости  $P(\text{FeII})$  и  $P(\text{TiII})$  для CP-звезд.

$a$  — для звезд A0.0—A8.0;  $б$  — для B8.5—A0.0;  $в$  — для B2.0—B8.5. Обозначения те же, что и на рис. 5. Большими углами отмечены верхние границы  $P(\text{FeII})$  и  $P(\text{TiII})$  для нормальных звезд (рис. 2, 4, 5).

ным исключением из этой корреляции является группка из пяти звезд в правом нижнем углу рис. 6,  $в$ , для которой  $P(\text{TiII}) \approx 2 \div 5$  при  $P(\text{FeII}) \approx 7 \div 10$ , однако реальность этого исключения требует дополнительного подтверждения.

Обратив внимание на тот факт, что некоторые CP-звезды типа «He-weak с усиленными линиями металлов», выделенные качественным методом, имеют весьма большие значения магнитных полей, например, HD 36 668, 74 521, 147 010, мы провели более полный анализ.

Из всей выборки CP-звезд с вычисленными  $P(\text{FeII})$  и  $P(\text{TiII})$  были отобраны звезды, у которых полусумма  $P(\text{Fe}, \text{Ti}) = 1/2 [P(\text{FeII}) + P(\text{TiII})] \geq 4$ . Таких звезд оказалось 22, из них для 15 имеются надежные значения  $\langle B_e \rangle$  с числом определений  $B_{e,i} n \geq 4$  [21]. Для этих 15 звезд  $\langle B_e \rangle = 2010$  Гс, из них для 11 звезд с  $P(\text{Fe}, \text{Ti}) \geq 4.7$  имеем  $\langle B_e \rangle = 2320$  Гс и для 7 звезд с  $P \geq 7$  имеем  $\langle B_e \rangle = 2810$  Гс. В табл. 2 приведены в целях сравнения данные о  $\langle B_e \rangle$  для CP-звезд других основных типов пекулярности. Сведения о  $\langle B_e \rangle$  взяты из [21].

Отсюда делаем вывод, что самыми слабыми магнитными полями обладают CP-звезды с сильно выраженной Hg, Mn-пекулярностью, т. е. собственно ртутно-марганцевые звезды [22]. Звезды с пекулярностями (Sr, Cr, Eu), Si, Si<sub>4200</sub> и He-weak, из числа которых, естественно, исключены CP-звезды с  $P(\text{Fe}, \text{Ti}) \geq 4$ , имеют  $\langle B_e \rangle = 1000$  Гс. Следовательно, у CP-звезд с резко усиленными линиями металлов Fe, Ti и, возможно, V магнитные поля в среднем в 2 раза больше, чем у остальных CP-звезд, причем имеется явно выраженная тенденция к росту  $\langle B_e \rangle$  с увеличением индексов пекулярности  $P(\text{FeII})$  и  $P(\text{TiII})$ . Во всяком слу-



ТАБЛИЦА 2

Диапазон $T_e$ , К	Основной тип пекулярности	$\langle B_e \rangle$ , Гс	$n$
7500—10000	Sr, Cr, Eu	905	61
10000—12000	Si	1065	45
10000—15000	Hg, Mn	415	25
12000—17500	Si, He-weak	1015	35
12000—17500	He-weak, metal-rich	2010	15

чае, у CP-звезд с  $3 \geq P(\text{Fe, Ti}) \geq 2$  имеем  $\langle B_e \rangle = 720$  Гс (8 звезд), с  $2 \geq P(\text{Fe, Ti}) \geq 1$  имеем  $\langle B_e \rangle = 490$  Гс (18 звезд).

**Заключение.** 1. Около 60% CP-звезд показывают аномально усиленные линии FeII и TiII [ $P(\text{Fe, Ti}) \geq 1.8$ ], причем это усиление начинает проявляться при  $T_e \geq 8800$  К и достигает максимального значения [ $P(\text{FeII}), P(\text{TiII}) \approx 10-13$ ] при  $T_e \approx 14\ 000-18\ 000$  К, становясь наравне с явным ослаблением линий HeI наиболее выразительной пекулярностью. Таким образом, введенный в [11] в качественной форме тип пекулярности получает более полное количественное обоснование. Аномальная интенсивность линий FeII и TiII проявляется как в больших индексах пекулярности  $P(\text{FeII})$  и  $P(\text{TiII})$ , достигающих 10—13, так и в больших значениях разницы  $Sp(\text{FeII, TiII}) - Sp(B-V)_0$ , достигающих для Вр-звезд половины спектрального класса.

2. Физически важным свойством этой Fe, Ti-пекулярности является корреляция между величиной индексов  $P(\text{FeII}), P(\text{TiII})$  и напряженностью магнитного поля  $\langle B_e \rangle$ : при  $P(\text{FeII}), P(\text{TiII}) \geq 4$  средняя величина магнитного поля достигает 2 кГс, с ростом  $P(\text{FeII}), P(\text{TiII})$  от 1—2 до 4—5 и до 8—12 величина  $\langle B_e \rangle$  возрастает от 0.5 кГс до 1.2 и 4.2 кГс соответственно. Присущая пекулярным элементам неравномерность в распределении по поверхности CP-звезд проявляется для FeII и TiII весьма выразительно [7, 14, 16, 23].

3. Наличие очевидной зависимости  $P(\text{FeII})$  от  $\lg \varepsilon(\text{Fe})$  (рис. 3, а) позволяет определить диапазон изменений  $\lg \varepsilon(\text{Fe})$  для CP-звезд. Экстраполяция зависимости вида  $\lg P(\text{FeII}), \lg \varepsilon(\text{Fe})$  на минимальные и максимальные значения  $\lg P(\text{FeII})$  дает для CP-звезд (в среднем по поверхности) значения  $\lg \varepsilon(\text{Fe})$

ТАБЛИЦА 3

Номер HD	$T_e$ , К	Тип пекулярности	$P(\text{FeII})$	$P(\text{TiII})$	$\langle B_e \rangle$ , Гс	$n$	Группировка
358	14000	HgMn	8.3	3.3	33	11	Группа Плеяд
25823	13250	Siλ4200 Sr	3.78	4.30	1120	6	»
27309	12300	Siλ4200 He-w	5.90	6.33	2020	13	»
35298	16500	He-w	8.45	3.5:	3900	5	Орион OB1a
35502	16770	He-w	10.0	4.36	2750	6	То же
34719	12700	Si CrEuHg	7.12	4.98	—	—	Группа Плеяд
36526	17130	He-w	7.10	8.88	3150	6	Орион OB1b
36540	16700	He-w	7.80	6.84	1000	4	» OB1c
36549	13270	He-w	5.17	3.87	—	—	» RB1d
36668	13200	Si He-w FeTi	4.10	4.37	1320	6	» OB1b
37058	23200	He-w SrTi	4.4:	5.4:	1400	11	» OB1c
36916	16250	He-w	5.25	4.04	1700:	2	То же
37140	16000	Si He-w Sr	5.00	4.97	670	6	Орион OB1b
37633	13800	He-w	4.45	4.24	—	—	То же
37642	16600	Si He-w	7.70	7.35	3110	6	Орион OB1c
37687	15800	Si? He-w	5.60	7.60	—	—	То же
74521	10970	He-w, metal-rich	3.70	4.48	1200	15	Группа Плеяд
139160	15000		7.00	3.3:	—	—	Скорпион-Центавр
142884	15870	Siλ4200 He-w	5.85	8.60	1130	11	То же
144661	16050	He-w Ga PHgMn	10.8	9.7	850	10	»
147010	13530	Si He-w SrCrFe	11.1	11.8	4600	20	»
148199	12050	Si SrCr	5.15	3.89	—	—	»

в интервале  $-2.2 \geq \lg \varepsilon(\text{Fe}) \geq -5.0$ , т. е. от минимального для нормальных звезд  $\lg \varepsilon(\text{Fe}) = -4.8$  до превосходящего среднее  $\overline{\lg \varepsilon(\text{Fe})} = -4.40$  [2] на 2.7 dex. Среднее (модальное) для CP-звезд значение  $\overline{\lg \varepsilon(\text{Fe})} = -3.3$ , т. е. более чем на порядок превосходит  $\lg \varepsilon(\text{Fe})$  для нормальных A- и B-звезд. Такие оценки обилия справедливы и для титана. Естественно, что при этих грубых оценках  $\lg \varepsilon$  магнитное усиление линий [5, 6] не учитывалось.

4. В заключение в табл. 3 приводится список CP-звезд с наибольшими значениями  $P(\text{FeII})$  и  $P(\text{TiII})$ . В последовательных столбцах таблицы даются номер звезды по каталогу HD,  $T_e$ , тип пекулярности из [10],  $P(\text{FeII})$ ,  $P(\text{TiII})$ , величина  $\langle B_e \rangle$  и число определений  $B_{e,i}$ . В последнем столбце таблицы указана принадлежность звезды к группировке (ассоциации или скоплению).

Автор выражает признательность В. Г. Ключковой и В. Е. Панчуку за предоставление данных о  $W_\lambda$  избранных линий FeII и TiII для нормальных звезд, изученных в [2], а также Л. В. Городовой и О. И. Щербаневой за помощь при подготовке статьи к печати.

### Литература

1. Ключкова В. Г., Копылов И. М., Панчук В. Е. К вопросу о применении моделей атмосфер для определения параметров горячих звезд // Астрон. журн. 1983. 60. С. 1114—1119.
2. Ключкова В. Г., Панчук В. Е. Спектроскопическое определение металличности звезд молодых рассеянных скоплений // Астрофиз. исслед. (Изв. САО). 1985. 20. С. 16—21.
3. Michaud G. Diffusion processes in peculiar A stars // Astrophys. J. 1970. 160. P. 641—658.
4. Havnnes O. Abundance Spots on peculiar A-stars and diffusion along the surface // Astron. Astrophys. 1975. 38. P. 105—108.
5. Уппо W. Line formation of a normal Zeeman triplet // Publ. Astron. Soc. Japan. 1956. 8. P. 108—125.
6. Боярчук А. А., Ефимов Ю. С., Степанов Е. В. Магнитное усиление линий поглощения в спектрах звезд // Изв. КрАО. 1960. 24. С. 52—77.
7. Копылов И. М., Кумайгородская Р. Н. Спектроскопическое исследование магнитно-переменной звезды  $\alpha^2$  CVn по спектрограммам высокого разрешения. III. Определение турбулентных скоростей в атмосфере с учетом «эффекта пятнистости» // Астрофиз. исслед. (Изв. САО). 1973. 5. С. 37—51.
8. Хохлова В. Л. Особенности аномалий химического состава магнитных Ar звезд // Astron. Nachr. 1976. 297. P. 217—227.
9. Леушин В. В. Количественное исследование пекулярностей в спектрах звезд Ar // Астрофиз. исслед. (Изв. САО). 1971. 3. С. 36—61.
10. Копылов И. М. Количественные спектральные индексы пекулярности CP-звезд верхней части главной последовательности // Астрофиз. исслед. (Изв. САО). 1987. 24. С. 44—67.
11. Jaschek M., Garcia Z. L. Spectroscopic studies of peculiar A-type stars. II: Two iron-rich stars of the Si-4200 group. // Zs. Astrophys. 1966. 64. P. 217.
12. Осава К. Spectral classification and three color photometry of A-type peculiar stars // Ann. Tokyo Astr. obs. 1965. 2, nr 3. P. 123—143.
13. Ключкова В. Г., Копылов И. М., Кумайгородская Р. Н. Пекулярные звезды в движущемся скоплении Скорпиона-Центавра // Письма в Астрон. журн. 1981. 7. С. 366—371.
14. Рупер D. M.  $\alpha^2$  Canum Venaticorum and the oblique rotator theory // Astrophys. J. Suppl. Ser. 1969. 18. P. 347—378.
15. Megessier C., Khokhlova V. L., Rjabchikova T. A. The oblique rotator model — discussion of Deutsch and Khokhlova methods // Astron. Astrophys. 1979. 71. P. 295—304.
16. Хохлова В. Л., Павлова В. М. Распределение элементов группы железа по поверхности магнитной звезды  $\alpha^2$  CVn. // Письма в Астрон. журн. 1984. 10. С. 377—387.
17. Копылов И. М. Эквивалентные ширины линий поглощения в спектрах 109 звезд 05—V7 // Изв. КрАО. 1958. 20. С. 123—155.
18. Копылов И. М. Двумерная спектральная количественная классификация 238 звезд 05—V7 и построение диаграммы «спектр—абсолютная величина» // Изв. КрАО. 1958. 20. С. 156—207.
19. Копылов И. М. Эквивалентные ширины линий поглощения в спектрах 62 звезд V8—G2 // Изв. КрАО. 1960. 22. С. 189—206.
20. Копылов И. М. Двумерная количественная спектральная классификация звезд спектральных классов V8—G2 // Изв. КрАО. 1960. 23. С. 148—173.

21. Глаголевский Ю. В., Клочкова В. Г., Копылов И. М. Об исследовании магнитных полей у пекулярных звезд разного возраста // Астрон. журн. 1986. 63.
22. Conti P. S. Zeeman measures of four double-lined peculiar A stars // Astrophys. J. 1970. 160. P. 1077—1082.
23. Картирование Fe и Sr на поверхности AP-звезды в Большой Медведицы / В. Веллау, Дж. Райс, Н. Е. Пискунов, В. Л. Хохлова // Письма в Астрон. журн. 1982. 8, № 1. С. 30—37.

Поступила в редакцию 11 июня 1986 г.

---