

ВОДОРОДНЫЕ ЛИНИИ В СПЕКТРАХ ПЕКУЛЯРНЫХ ЗВЕЗД

В. В. Леушин

Исследуются эквивалентные ширины водородных линий и параметры атмосфер звезд, полученные по этим линиям. Рассматриваются различия параметров атмосфер пекулярных и нормальных звезд. Показано, что все эти различия могут быть объяснены повышенным содержанием легко ионизируемых элементов в атмосферах пекулярных звезд.

The equivalent widths of the hydrogen lines as well as the parameters of stellar atmospheres obtained from these lines are investigated. The differences are considered in parameters of the atmospheres of the peculiar and normal stars. All these differences are shown to be explained by a higher abundance of the easy ionizable elements in the atmospheres of the peculiar stars.

1. ВВЕДЕНИЕ

Линии водорода, достигающие максимальной интенсивности в спектрах звезд классов А0-А2, позволяют получить наиболее точно определяемые — по спектрограммам с умеренной дисперсией — характеристики физических условий в атмосферах звезд Ар. В связи с этим водородные линии звезд Ар часто и подробно изучались. Однако почти все работы посвящены обстоятельному изучению изменений этих линий в одной-двух пекулярных звездах [1—7]. Сравнительные же исследования (по отношению к нормальным звездам) были проведены, когда еще не было точной спектральной классификации звезд Ар, что сильно затрудняло подбор звезд сравнения [8, 9].

Суммируя результаты проведенных ранее исследований водородных линий в спектрах звезд Ар, можно выделить такие факты.

1. Различия контуров и эквивалентных ширин линий у пекулярных и нормальных звезд малы (некоторые авторы вообще отрицают их существование [10]).

2. Как правило, крылья линий в пекулярных звездах шире, чем в нормальных, а центры уже [4, 11].

3. Характер различий контуров линий у пекулярных и нормальных звезд зависит от типа пекулярности звезды [8, 9].

4. Различий электронных плотностей (n_e) звезд Ар и нормальных звезд замечено не было [8, 9].

5. Интенсивности линий в спектрах пекулярных звезд подвержены значительным изменениям, достигающим нескольких ангстрем за время порядка нескольких минут [1—3, 12].

6. Изменения эквивалентных ширин и контуров обусловлены в основном изменениями ширин линий [6], центральные глубины (R_0) если и меняются, то очень мало.

В настоящей работе, являющейся продолжением исследований пекулярных звезд по спектрограммам с дисперсией $15 \text{ \AA}/\text{мм}$ [13, 14], проведено сравнение некоторых характеристик атмосфер пекулярных и нормальных звезд, определенных по линиям водорода.

2. МАТЕРИАЛ НАБЛЮДЕНИЙ И ЕГО ИССЛЕДОВАНИЕ

Располагая довольно обширным наблюдательным материалом — спектрограммами 56 звезд Ар и 28 нормальных звезд — и основываясь при сравнении на количественных спектральных классах [13], можно было рассчитывать на получение достаточно уверенных результатов. Характеристики спектрографического материала и исследуемых звезд приведены в [13, 14]. Значения измеренных эквивалентных ширин и центральных глубин водородных линий даны в табл. 1 и 2.

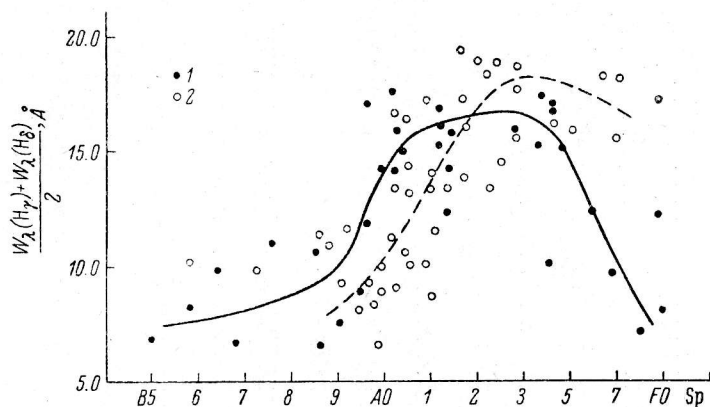


Рис. 1. Сопоставление зависимостей эквивалентных ширин линий $[W_\lambda(H_\gamma) + W_\lambda(H_\delta)] / 2$ от спектрального класса Sp. Сплошная кривая — средняя для нормальных (1), штриховая — средняя для пекулярных (2) звезд.

Для звезд Ар и нормальных звезд мы построили зависимости полусумм эквивалентных ширин водородных линий H_γ и H_δ от количественного спектрального класса (рис. 1). Из сопоставления этих зависимостей можно видеть, что 1) средняя кривая для звезд Ар сдвинута в сторону более поздних спектральных классов примерно на один подкласс, 2) в области спектральных классов более поздних, чем A2.0, эквивалентные ширины у звезд Ар примерно на 15% больше, чем у нормальных. Это увеличение остается независимо от того, введем мы какую-либо поправку в спектральный класс для звезд Ар или нет.

По имеющимся у нас значениям W_λ и R_0 для водородных линий обычными методами [15] были определены электронные плотности ($\lg n_e$). Значения максимальной центральной глубины (R_0) находились из графиков $R_0 = f_1(n)$, а номер последней определяемой линии серии Бальмера — как среднее из двух значений, получаемых при экстраполяции кривых $R_0 = f_1(n)$ и $W_\lambda = f_2(n)$ к нулю. Значения $\lg N_{0,2} \text{ H}$, $\lg n_e(H_\gamma, H_\delta)$ и $\lg n_e(n_m)$ после введения всех необходимых поправок (за вращение, переналожение крыльев и т. д. [16]) приведены в табл. 3.

Сопоставление зависимостей $\lg n_e$ от спектрального класса для пекулярных и нормальных звезд дано на рис. 2. На этих графиках приведены кривые, соответствующие средним значениям $\lg n_e$ для нормальных звезд V и III классов светимости. Кривые эти взяты из [15], причем в зна-

ТАБЛИЦА 1

Эквивалентные ширины линии (W_λ) водорода в Å

| № п/п | Название звезды | Линии серии Бальмера, длины волн, Å | | | | | | | | | | | | | | | |
|-------|--------------------|-------------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | | H _γ | H _δ | H _ε | H _ζ | H _η | H ₁₀ | H ₁₁ | H ₁₂ | H ₁₃ | H ₁₄ | H ₁₅ | H ₁₆ | H ₁₇ | H ₁₈ | H ₁₉ | H ₂₀ |
| | | 4340 | 4162 | 3970 | 3889 | 3835 | 3798 | 3771 | 3750 | 3734 | 3722 | 3712 | 3704 | 3697 | 3692 | 3687 | 3683 |
| 1 | α And | 7.9 | 8.6 | 9.5 | 7.8 | 7.9 | 6.2 | 4.5 | 3.3 | 2.2 | 1.3 | 1.0 | 0.5 | 0.2 | 0.2 | 0.3 | — |
| 2 | HR 234 | 18.3 | 18.5 | 14.7 | 11.8 | 11.3 | 9.0 | 6.6 | 4.7 | 2.5 | 1.8 | 1.0 | — | — | — | — | — |
| 3 | 87 Psc | 9.4 | 10.6 | 10.6 | 8.4 | 8.3 | 6.3 | 4.9 | 3.6 | 2.3 | 1.4 | 0.9 | 0.5 | 0.4 | 0.2 | 0.2 | — |
| 4 | HR 465 | 16.7 | 14.6 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 5 | 43 Cas | 11.0 | 11.7 | 11.6 | 10.7 | 9.8 | 8.0 | 5.1 | 4.3 | 2.9 | 2.0 | 1.6 | 0.6 | 0.2 | 0.1 | — | — |
| 6 | 63 And | 10.7 | 11.0 | 10.0 | 8.4 | 7.4 | 6.5 | 5.2 | 3.7 | 2.2 | 0.7 | 0.8 | 0.2 | — | — | — | — |
| 7 | α Psc | 12.6 | 13.5 | 12.6 | 10.8 | 9.6 | 7.6 | 5.5 | 4.3 | 3.2 | 1.9 | 1.4 | 0.8 | 0.6 | 0.1 | — | — |
| 8 | ι Cas | 17.2 | 17.4 | 18.8 | 13.8 | 10.5 | 7.6 | 5.3 | 4.3 | 2.9 | 1.6 | 0.8 | 1.0 | 1.2 | 0.4 | — | — |
| 9 | 21 Per | 12.0 | 10.4 | 10.0 | 9.6 | 7.8 | 6.0 | 5.0 | 3.5 | 3.2 | 2.0 | 2.2 | 1.0 | 0.4 | 0.3 | 0.2 | — |
| 10 | SX Ari | 11.6 | 10.6 | 9.9 | 8.1 | 7.2 | 6.5 | 4.4 | 3.3 | 2.2 | 1.4 | 0.9 | 0.4 | 0.4 | 0.3 | 0.6 | — |
| 11 | HR 976 | 14.0 | 16.6 | 15.0 | 10.1 | 10.1 | 7.0 | 5.7 | 4.3 | 2.9 | 2.0 | 1.7 | 1.4 | 0.8 | 0.5 | 0.5 | — |
| 12 | ζ Tau | 10.8 | 11.1 | 11.4 | 9.7 | 8.7 | 7.0 | 5.3 | 3.4 | 2.1 | 0.5 | 0.1 | 0.1 | — | — | — | — |
| 13 | 41 Tau | 10.3 | 9.1 | 9.3 | 9.0 | 7.9 | 6.4 | 5.1 | 3.3 | 2.3 | 1.3 | 0.7 | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.2 | 0.1 |
| 14 | θ ² Tau | 13.0 | 14.4 | 9.9 | 8.7 | 7.3 | 5.1 | 3.9 | 2.6 | 1.6 | 1.2 | 0.8 | 0.4 | 0.2 | — | — | — |
| 15 | 68 Tau | 18.9 | 18.3 | 17.0 | 13.2 | 12.3 | 10.2 | 7.1 | 5.2 | 2.8 | 1.5 | 1.5 | 0.8 | — | — | — | — |
| 16 | β Lep | 7.8 | 8.3 | 9.5 | 8.0 | 8.1 | 7.5 | 6.3 | 4.4 | 3.4 | 2.6 | 2.3 | 2.0 | 1.0 | 0.6 | 0.4 | — |
| 17 | β Tau | 6.3 | 6.8 | 7.2 | 7.0 | 6.6 | 5.8 | 4.2 | 2.8 | 2.1 | 1.3 | 0.8 | 0.3 | 0.3 | — | — | — |
| 18 | 27 Aur | 17.9 | 19.6 | 17.3 | 13.8 | 11.5 | 10.1 | 6.8 | 4.5 | 2.9 | 2.0 | 1.6 | 0.6 | — | — | — | — |
| 19 | 137 Tau | 13.0 | 13.7 | 12.8 | 10.7 | 10.8 | 9.6 | 8.3 | 5.5 | 3.7 | 1.6 | 1.2 | 1.5 | 0.8 | — | — | — |
| 20 | θ Aur | 8.3 | 8.6 | 8.7 | 8.3 | 8.2 | 7.0 | 5.8 | 3.9 | 2.7 | 0.9 | 1.1 | 0.5 | 0.5 | — | — | — |
| 21 | 53 Aur | 16.3 | 16.3 | 15.3 | 14.1 | 12.2 | 9.2 | 7.2 | 4.7 | 2.8 | 1.6 | 1.5 | — | — | — | — | — |
| 22 | HR 2534 | 11.4 | 14.9 | 13.3 | 11.1 | 9.9 | 8.8 | 7.0 | 5.1 | 3.9 | 2.3 | 1.4 | 1.0 | 0.5 | — | — | — |
| 23 | 3 Hya | 17.2 | 17.3 | 14.5 | 9.4 | 10.0 | 7.0 | 3.8 | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 24 | χ Cnc | 6.9 | 6.0 | 7.5 | 5.7 | 5.9 | 5.4 | 4.4 | 4.0 | 3.1 | 1.9 | 1.1 | 0.7 | 0.5 | 0.2 | 0.2 | — |
| 25 | 30 UMa | 12.5 | 14.1 | 14.5 | 11.6 | 10.3 | 7.7 | 6.1 | 4.6 | 3.5 | 2.4 | 1.4 | 0.8 | 0.5 | 0.2 | — | — |
| 26 | θ Leo | 15.0 | 15.4 | 14.2 | 12.9 | 10.8 | 8.2 | 6.2 | 4.0 | 2.9 | 2.1 | 1.4 | 0.7 | 0.6 | 0.4 | 0.3 | — |
| 27 | HR 4369 | 14.3 | 22.2 | 22.2 | 13.1 | 11.1 | 8.2 | 4.8 | 3.8 | 3.2 | 1.6 | 0.9 | — | — | — | — | — |
| 28 | 17 Com | 14.5 | 13.2 | 12.0 | 9.8 | — | 7.7 | 6.3 | 4.3 | 2.6 | 1.7 | 1.1 | 0.6 | 0.1 | 0.1 | — | — |
| 29 | 21 Com | 18.0 | 18.5 | 16.9 | 13.7 | 12.0 | 8.9 | 5.9 | 3.8 | 3.1 | 3.1 | 2.3 | 1.5 | 1.0 | 0.2 | — | — |
| 30 | HR 4816 | 16.0 | 17.2 | 15.6 | 16.0 | 15.0 | 11.1 | 6.9 | 5.0 | 2.4 | 1.4 | 1.0 | — | — | — | — | — |
| 31 | γ Vir | 5.8 | 8.0 | 8.2 | 4.1 | 6.0 | 4.2 | 2.2 | 1.7 | 1.0 | 0.9 | 0.9 | — | — | — | — | — |
| 32 | HR 4854 | 13.0 | 13.5 | 14.1 | 11.6 | 11.2 | 10.0 | 8.8 | 5.6 | 4.4 | 2.8 | 1.9 | 1.3 | 1.1 | 0.6 | 0.5 | 0.5 |
| 33 | ε UMa | 15.4 | 13.6 | 11.0 | 9.5 | 9.1 | 8.0 | 5.8 | 4.4 | 3.4 | 2.5 | 1.7 | 0.8 | 0.6 | 0.5 | 0.3 | — |
| 34 | α ² CVn | 7.2 | 10.8 | 10.0 | 9.2 | 8.2 | 7.5 | 5.8 | 4.6 | 3.0 | 2.1 | 1.5 | 0.5 | 0.5 | 0.3 | — | — |
| 35 | 78 Vir | 12.8 | 16.0 | 14.7 | 13.1 | 8.8 | 9.3 | 6.3 | 5.2 | 2.8 | 2.5 | 1.7 | 1.3 | 1.0 | 0.7 | — | — |
| 36 | α Dra | 15.8 | 13.0 | 13.9 | 12.0 | 11.9 | 9.5 | 7.3 | 5.8 | 4.2 | 3.1 | 1.1 | 0.6 | 0.3 | — | — | — |
| 37 | CU Vir | 9.1 | 10.6 | 10.2 | 8.8 | 7.9 | 6.7 | 5.1 | 3.5 | 2.4 | 1.5 | 0.9 | 0.4 | 0.2 | — | — | — |
| 38 | π Boo | 9.2 | 8.8 | 8.9 | 8.3 | 7.5 | 6.6 | 5.8 | 4.6 | 3.2 | 2.3 | 1.5 | 0.9 | 0.6 | 0.8 | — | — |
| 39 | γ UMi | 9.7 | 9.3 | 10.0 | 8.1 | 7.8 | 6.5 | 5.7 | 5.1 | 4.2 | 3.4 | 3.0 | 2.3 | 1.8 | 1.5 | 1.2 | 0.6 |
| 40 | β CrB | 16.1 | 17.8 | 15.6 | 8.4 | 9.2 | 6.0 | 4.1 | 2.8 | 2.8 | 1.7 | 1.1 | 0.9 | 0.5 | 0.6 | 0.5 | 0.5 |
| 41 | ι CrB | 12.4 | 11.8 | 11.3 | 10.7 | 9.2 | 8.3 | 5.6 | 4.5 | 2.7 | — | — | — | — | — | — | — |
| 42 | ω Her | 14.5 | 18.5 | 14.6 | 12.5 | 11.4 | 8.8 | 7.4 | 5.3 | 3.5 | 2.5 | 2.0 | 1.2 | 0.8 | 0.4 | 0.3 | — |
| 43 | 45 Her | 13.1 | 13.8 | 13.8 | 12.2 | 12.0 | 9.6 | 7.0 | 2.5 | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 44 | 52 Her | 15.4 | 20.7 | 13.7 | 11.6 | 12.0 | 9.9 | 5.8 | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 45 | HR 6326 | 17.3 | 18.7 | 16.7 | 14.8 | 9.6 | 7.7 | 5.8 | 4.0 | 3.4 | 2.1 | 2.3 | — | — | — | — | — |
| 46 | HR 7058 | 9.2 | 10.6 | 9.2 | 8.8 | 8.4 | 7.7 | 6.7 | 4.9 | 3.5 | 1.2 | 0.7 | — | — | — | — | — |
| 47 | 112 Her | 10.0 | 10.8 | 9.4 | 8.0 | 8.6 | 7.4 | 6.2 | 4.7 | 3.3 | 1.3 | 1.0 | 0.4 | 0.1 | — | — | — |
| 48 | 10 Aql | 14.1 | 17.8 | 16.8 | 12.5 | 10.7 | 9.0 | 7.1 | 4.9 | 2.9 | 3.1 | 2.0 | 1.7 | 1.3 | 0.8 | — | — |
| 49 | 21 Aql | 6.7 | 8.2 | 6.8 | 6.5 | 6.4 | 5.8 | 5.0 | 3.8 | 2.8 | 2.1 | 1.3 | 0.9 | 0.5 | 0.4 | 0.2 | 0.1 |
| 50 | 4 Cyg | 8.8 | 9.0 | 9.1 | 8.2 | 8.1 | 6.9 | 5.8 | 4.0 | 2.8 | 1.7 | 1.1 | 0.6 | 0.4 | 0.3 | — | — |
| 51 | HR 7575 | 15.1 | 17.0 | 18.5 | 13.4 | 11.8 | 9.9 | 7.8 | 5.6 | 3.7 | 2.4 | 1.6 | 1.0 | 1.0 | — | — | — |
| 52 | 73 Dra | 14.5 | 17.0 | 12.5 | 10.8 | 11.2 | 9.9 | 7.6 | 5.8 | 4.2 | 2.8 | 1.6 | 1.3 | 0.8 | 0.6 | 0.6 | — |
| 53 | γ Equ | 13.0 | 18.5 | 17.3 | 11.7 | 10.5 | 8.9 | 6.0 | 4.8 | 3.2 | 2.6 | 2.2 | 1.8 | 1.4 | 0.6 | — | — |
| 54 | HR 8216 | 19.0 | 18.2 | 15.8 | 12.7 | 11.0 | 9.1 | 6.3 | 5.0 | 3.4 | 1.8 | 1.6 | 1.1 | 1.1 | 0.6 | 0.4 | 0.5 |
| 55 | 38 Aqr | 10.4 | 10.0 | 11.2 | 9.6 | 10.8 | 9.8 | 7.4 | 5.6 | 3.4 | 2.5 | 1.7 | 0.9 | 0.9 | 0.2 | — | — |
| 56 | CG And | 7.9 | 10.2 | 9.1 | 7.0 | 5.2 | 3.3 | 2.0 | 1.3 | 0.8 | 0.5 | 0.3 | 0.3 | 0.1 | — | — | — |
| 57 | β Tri | 17.1 | 16.8 | 16.2 | 11.9 | 11.0 | 8.4 | 6.7 | 4.6 | 3.0 | 2.0 | 1.4 | 1.0 | 0.7 | 0.3 | 0.3 | 0.2 |
| 58 | γ Cet | 18.0 | 17.3 | 16.0 | 12.0 | 10.1 | 8.6 | 6.2 | 3.9 | 2.1 | 0.3 | 0.7 | 0.6 | — | — | — | — |
| 59 | η Tau | 6.6 | 6.6 | 6.4 | 5.8 | 5.5 | 4.8 | 3.7 | 3.0 | 1.9 | 1.4 | 0.9 | 0.5 | — | — | — | — |
| 60 | HR 1242 | 12.1 | 13.6 | 12.0 | 10.4 | 10.1 | 8.4 | 5.8 | 4.7 | 3.4 | 2.8 | 2.0 | 2.0 | 1.0 | — | — | — |
| 61 | γ Gem | 16.2 | 17.5 | 16.5 | 13.2 | 11.2 | 9.9 | 7.7 | 5.7 | 3.4 | 2.9 | 1.6 | 1.5 | 0.8 | 0.7 | 0.2 | — |
| 62 | α CMa | 14.0 | 16.0 | 14.3 | 11.5 | 10.8 | 8.4 | 5.8 | 3.6 | 2.6 | 1.6 | 0.8 | 0.5 | 0.3 | 0.2 | 0.1 | — |
| 63 | 2 Hya | 13.0 | 17.2 | 14.0 | 10.2 | 9.7 | 8.1 | 6.2 | 4.4 | 3.9 | 2.6 | — | — | — | — | — | — |
| 64 | χ Hya | 9.4 | 8.6 | 8.1 | 7.9 | 7.2 | 6.2 | 5.6 | 3.8 | 2.6 | 1.4 | 0.9 | 0.5 | — | — | — | — |
| 65 | ζ Leo | 7.4 | 8.3 | 8.0 | 6.6 | 7.0 | 6.1 | 3.8 | 2.9 | 2.5 | 1.5 | 1.0 | 1.0 | 0.5 | 0.5 | 0.1 | 0.2 |
| 66 | λ UMa | 14.8 | 17.2 | 15.0 | 13.1 | 11.6 | 9.2 | 6.0 | 4.2 | 3.4 | 2.2 | 1.4 | 1.0 | 0.5 | 0.4 | 0.2 | — |
| 67 | β UMa | 15.0 | 16.6 | 15.4 | 13.9 | 12.2 | 9.4 | 7.3 | 5.2 | 3.6 | 2.5 | 1.9 | 1.2 | 0.9 | 0.6 | 0.5 | 0.2 |
| 68 | γ Crv | 8.5 | 8.7 | 8.5 | 7.7 | 7.5 | 6.6 | 5.1 | 4.1 | 3.0 | 2.4 | 1.4 | 1.1 | 0.6 | 0.2 | — | — |
| 69 | η Vir | 15.0 | 16.8 | 15.1 | 12.3 | 11.0 | 8.7 | 6.1 | 4.7 | 3.4 | 3.0 | 2.0 | 1.3 | 1.2 | 0.6 | 0.9 | 0.6 |
| 70 | θ Vir | 14.5 | 13.4 | 13.6 | 12.9 | 11.5 | 9.4 | 7.4 | 5.2 | 4.0 | 2.7 | 2.5 | 1.4 | 1.1 | 0.8 | 0.8 | 0.3 |
| 71 | γ Boo | 11.4 | 12.6 | 13.5 | 9.8 | 9.4 | 7.1 | 4.9 | 4.0 | 2.7 | 1.8 | 1.3 | 1.1 | 0.6 | 0.3 | 0.3 | — |
| 72 | HR 5780 | 9.8 | 9.8 | 8.3 | 7.3 | 9.3 | 8.5 | 5.0 | 4.9 | 3.4 | 2.3 | 1.3 | 0.6 | 0.4 | 0.4 | 0.3 | — |
| 73 | β Ser | 16.8 | 18.3 | 16.2 | 13.1 | 12.0 | 8.6 | 6.2 | 4.1 | 2.9 | 1.3 | 1.3 | 1.0 | — | — | — | — |
| 74 | δ Her | 15.1 | 16.0 | 15.8 | 12.2 | 11.1 | 8.0 | 6.1 | 4.1 | 2.7 | 1.9 | 1.2 | 0.8 | 0.5 | 0.4 | — | — |
| 75 | μ Oph | 8.0 | 7.9 | 7.9 | 7.4 | 6.6 | 5.2 | 4.4 | 3.9 | 2.6 | 2.1 | 1.4 | 1.0 | 0.7 | 0.5 | 0.3 | — |
| 76 | γ Oph | 17.2 | 16.8 | 15.9 | 15.1 | 13.5 | 9.7 | 6.7 | 4.4 | 3.4 | 2.4 | 1.4 | 0.9 | 0.7 | 0.5 | — | — |
| 77 | α Lyr | 18.4 | 17.1 | 14.9 | 13.5 | 10.8 | 7.8 | 5.6 | 3.7 | 2.7 | 1.9 | 1.3 | 0.8 | 0.4 | 0.3 | 0.2 | — |
| 78 | ι Aql | 8.4 | 8.1 | 8.4 | 7.8 | 8.7 | 7.7 | 6.2 | 4.6 | 3.7 | 2.7 | 1.6 | 1.0 | 0.6 | 0.5 | 0.3 | — |

ТАБЛИЦА 1 (продолжение)

| № п/п | Название звезды | Линии серии Бальмера, длины волн, Å | | | | | | | | | | | | | | | |
|----------|--------------------|-------------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | | H _γ | H _δ | H _ε | H ₈ | H ₉ | H ₁₀ | H ₁₁ | H ₁₂ | H ₁₃ | H ₁₄ | H ₁₅ | H ₁₆ | H ₁₇ | H ₁₈ | H ₁₉ | H ₂₀ |
| | | 4340 | 4162 | 3970 | 3889 | 3835 | 3798 | 3771 | 3750 | 3734 | 3722 | 3712 | 3704 | 3697 | 3692 | 3687 | 3683 |
| 79 | δ Cyg | 10.4 | 10.6 | 10.4 | 9.3 | 8.1 | 7.1 | 6.0 | 4.3 | 3.2 | 2.0 | 1.4 | 1.0 | 0.6 | 0.2 | 0.2 | — |
| 80 | z Cep | 14.8 | 13.9 | 12.2 | 11.8 | 11.5 | 8.9 | 6.7 | 4.9 | 3.6 | 2.6 | 2.0 | 1.4 | 1.0 | 0.5 | 0.3 | 0.2 |
| 81 | 29 Vul | 15.8 | 16.0 | 14.9 | 12.8 | 11.4 | 8.8 | 7.8 | 4.6 | 2.7 | 2.2 | 1.3 | 0.8 | 0.5 | 0.4 | 0.3 | — |
| 82 | 28 Vul | 6.8 | 6.8 | 7.0 | 6.5 | 6.4 | 6.0 | 4.2 | 3.0 | 2.1 | 1.0 | 0.5 | 0.3 | — | — | — | — |
| 83 | ε Del | 8.9 | 11.2 | 12.5 | 7.6 | 8.5 | 6.6 | 4.3 | 3.7 | 2.8 | 1.9 | 1.5 | 1.2 | 1.0 | 1.0 | 1.2 | — |
| 84 | α Peg | 12.1 | 11.5 | 10.9 | 9.8 | 9.4 | 8.5 | 7.3 | 5.3 | 3.6 | 2.2 | 1.6 | 0.8 | 0.5 | 0.6 | — | — |

ТАБЛИЦА 2

Центральные глубины (R₀) линий водорода

| № п/п | Название звезды | Линии серии Бальмера, длины волн, Å | | | | | | | | | | | | | | | |
|----------|--------------------|-------------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | | H _γ | H _δ | H _ε | H ₈ | H ₉ | H ₁₀ | H ₁₁ | H ₁₂ | H ₁₃ | H ₁₄ | H ₁₅ | H ₁₆ | H ₁₇ | H ₁₈ | H ₁₉ | H ₂₀ |
| | | 4340 | 4162 | 3970 | 3889 | 3835 | 3798 | 3771 | 3750 | 3734 | 3722 | 3712 | 3704 | 3697 | 3692 | 3687 | 3683 |
| 1 | α And | 0.66 | 0.67 | 0.66 | 0.66 | 0.64 | 0.60 | 0.54 | 0.48 | 0.39 | 0.28 | 0.22 | 0.12 | 0.07 | 0.05 | — | — |
| 2 | HR 234 | .95 | .87 | .85 | .82 | .86 | .83 | .77 | .63 | .58 | .44 | .29 | .22 | — | — | — | — |
| 3 | 87 Psc | .75 | .73 | .70 | .68 | .72 | .65 | .63 | .54 | .42 | .36 | .28 | .20 | .14 | .08 | — | — |
| 4 | HR 465 | .82 | .75 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 5 | 43 Cas | .85 | .84 | .81 | .79 | .77 | .74 | .72 | .63 | .56 | .47 | .36 | .24 | .15 | .08 | — | — |
| 6 | 63 And | .71 | .73 | .70 | .68 | .67 | .63 | .59 | .53 | .41 | .20 | — | — | — | — | — | — |
| 7 | α Psc | .73 | .76 | .70 | .68 | .68 | .64 | .57 | .52 | .41 | .35 | .27 | .20 | .20 | .10 | — | — |
| 8 | ι Cas | .89 | .92 | .89 | .84 | .81 | .85 | .77 | .78 | .68 | .54 | .39 | .32 | .32 | .15 | — | — |
| 9 | 21 Per | .83 | .89 | .82 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 10 | SX Ari | .70 | .68 | .66 | .66 | .63 | .62 | .60 | .50 | .40 | .30 | .23 | .14 | .12 | — | — | — |
| 11 | HR 976 | .86 | .85 | .83 | .79 | .77 | .85 | .68 | .63 | .55 | .45 | .37 | .37 | .23 | — | — | — |
| 12 | ζ Tau | .62 | .60 | .60 | .58 | .58 | .55 | .49 | .40 | .28 | — | — | — | — | — | — | — |
| 13 | 41 Tau | .72 | .74 | .69 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 14 | θ ² Tau | .75 | .75 | .71 | .68 | .68 | .61 | .55 | .49 | .46 | .36 | .24 | .16 | — | — | — | — |
| 15 | 68 Tau | .78 | .80 | .81 | .74 | .76 | .75 | .66 | .62 | .45 | .30 | .28 | .22 | .18 | — | — | — |
| 16 | μ Lep | .81 | .81 | .81 | .74 | .80 | .85 | .88 | .73 | .63 | .55 | .52 | .52 | .42 | — | — | — |
| 17 | β Tau | .54 | .58 | .60 | .61 | .56 | .51 | .48 | .40 | .34 | .23 | .18 | .10 | — | — | — | — |
| 18 | 27 Aur | .87 | .86 | .87 | .84 | .80 | .80 | .74 | .67 | .55 | .46 | .40 | .35 | .23 | — | — | — |
| 19 | 137 Tau | .77 | .85 | .83 | .78 | .78 | .74 | .65 | .55 | .33 | .40 | .26 | .20 | — | — | — | — |
| 20 | θ Aur | .70 | .70 | .70 | .69 | .66 | .66 | .60 | .54 | .45 | .32 | .28 | — | — | — | — | — |
| 21 | 53 Aur | .80 | .78 | .75 | .75 | .74 | .72 | .64 | .55 | .38 | .31 | .28 | .15 | — | — | — | — |
| 22 | HR 2534 | .88 | .85 | .81 | .78 | .80 | .76 | .76 | .70 | .56 | .49 | .39 | .25 | .19 | — | — | — |
| 23 | 3 Hya | .80 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 24 | z Cnc | .80 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 25 | 30 UMa | .88 | .85 | .83 | .79 | .81 | .76 | .75 | .67 | .63 | .54 | .36 | .23 | .18 | .10 | — | — |
| 26 | θ Leo | .86 | .86 | .86 | .82 | .82 | .79 | .73 | .60 | .56 | .49 | .39 | .28 | .23 | .14 | — | — |
| 27 | HR 4369 | .78 | .82 | .75 | .71 | .61 | .52 | .49 | .38 | .31 | .25 | — | — | — | — | — | — |
| 28 | 17 Com | .94 | .88 | .88 | .80 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 29 | 21 Com | .89 | .85 | .85 | .78 | .76 | .74 | .66 | .60 | .60 | .64 | .54 | .44 | .34 | .22 | — | — |
| 30 | HR 4816 | .82 | .89 | .85 | .73 | .76 | .71 | .65 | .50 | .43 | .25 | .20 | — | — | — | — | — |
| 31 | γ Vir | .91 | .82 | .83 | .83 | .70 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 32 | HR 4854 | .95 | .92 | .89 | .81 | .90 | .90 | .86 | .75 | .66 | .68 | .47 | .44 | .27 | .22 | — | — |
| 33 | ε UMa | .95 | .91 | .87 | .81 | .81 | .81 | .75 | .70 | .63 | .57 | .49 | .35 | .29 | .20 | .15 | — |
| 34 | α ² CVn | .86 | .78 | .80 | .72 | .78 | .78 | .74 | .66 | .55 | .50 | .40 | .26 | .17 | .13 | — | — |
| 35 | 78 Vir | .92 | .86 | .82 | .86 | .76 | .76 | .70 | .62 | .51 | .50 | .33 | .31 | .26 | — | — | — |
| 36 | α Dra | .75 | .87 | .84 | .78 | .82 | .82 | .72 | .68 | .58 | .51 | .50 | .24 | .17 | — | — | — |
| 37 | CU Vir | .69 | .69 | .67 | .68 | .67 | .64 | .60 | .53 | .40 | .39 | .21 | .12 | .12 | .10 | — | — |
| 38 | π Boo | .75 | .80 | .81 | .76 | .78 | .73 | .71 | .66 | .51 | .41 | .32 | .22 | .13 | — | — | — |
| 39 | γ UMi | .71 | .72 | .83 | .71 | .74 | .73 | .73 | .74 | .68 | .63 | .57 | .33 | .47 | .40 | .37 | .21 |
| 40 | β CrB | .84 | .84 | .79 | .68 | .75 | .69 | .59 | .55 | .48 | .48 | .35 | .30 | .26 | .23 | .22 | .20 |
| 41 | ι CrB | .83 | .86 | .85 | .73 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 42 | ω Her | .97 | .88 | .85 | .83 | .82 | .80 | .78 | .74 | .66 | .56 | .48 | .40 | .32 | .25 | .18 | .14 |
| 43 | 45 Her | .96 | .86 | .84 | .80 | .81 | .80 | .76 | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 44 | 52 Her | .95 | .97 | .87 | .82 | .77 | .74 | .66 | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 45 | HR 6326 | .97 | .90 | .82 | .86 | .86 | .83 | .82 | .78 | .58 | .53 | .41 | .25 | .22 | .19 | — | — |
| 46 | HR 7058 | .97 | .94 | .89 | .82 | .82 | .80 | .78 | .68 | .58 | .41 | — | — | — | — | — | — |
| 47 | 112 Her | .92 | .86 | .79 | .79 | .78 | .78 | .75 | .70 | .65 | .36 | .33 | .18 | .13 | — | — | — |
| 48 | 10 Aql | .88 | .89 | .90 | .83 | .72 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 49 | 21 Aql | .76 | .71 | .71 | .72 | .73 | .72 | .70 | .63 | .55 | .52 | .43 | .32 | .23 | .18 | .12 | .08 |
| 50 | 4 Cyg | .78 | .76 | .75 | .74 | .74 | .72 | .65 | .59 | .52 | .36 | .28 | .19 | .13 | .13 | — | — |
| 51 | HR 7575 | .95 | .92 | .87 | .88 | .87 | .79 | .81 | .77 | .56 | .34 | .32 | .26 | — | — | — | — |
| 52 | 73 Dra | .96 | .95 | .89 | .88 | .92 | .84 | .86 | .80 | .75 | .65 | .54 | .42 | .31 | .26 | .20 | — |
| 53 | γ Equ | .90 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 54 | HR 8216 | .88 | .88 | .85 | .79 | .77 | .81 | .78 | .65 | .59 | .46 | .39 | .34 | .31 | .22 | .19 | — |
| 55 | 38 Aqr | .84 | .80 | .79 | .77 | .83 | .78 | .77 | .70 | .66 | .60 | .54 | .31 | .28 | .16 | — | — |
| 56 | CG And | .80 | .82 | .78 | .70 | .74 | .68 | .71 | .61 | .45 | .34 | .24 | .18 | .15 | .11 | .09 | — |
| 57 | β Tri | .76 | .80 | .80 | .75 | .76 | .72 | .66 | .64 | .54 | .52 | .34 | .27 | .24 | .16 | .16 | .11 |
| 58 | γ Cet | .73 | .74 | .74 | .67 | .68 | .63 | .51 | .38 | .20 | .28 | .22 | .22 | — | — | — | — |
| 59 | 7 Tau | .59 | .66 | .63 | .63 | .63 | .63 | .62 | .57 | .51 | .38 | .23 | .23 | .13 | — | — | — |
| 60 | HR 1242 | .93 | .92 | .94 | .89 | .90 | .93 | .96 | .88 | .83 | .88 | .70 | .68 | .45 | — | — | — |

ТАБЛИЦА 2 (продолжение)

| № ц/л | Название звезды | Линии серии Бальмера, длины волн, Å | | | | | | | | | | | | | | | |
|----------|--------------------|-------------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | | H _γ | H _δ | H _ε | H ₈ | H ₉ | H ₁₀ | H ₁₁ | H ₁₂ | H ₁₃ | H ₁₄ | H ₁₅ | H ₁₆ | H ₁₇ | H ₁₈ | H ₁₉ | H ₂₀ |
| | | 4340 | 4162 | 3970 | 3889 | 3835 | 3798 | 3771 | 3750 | 3734 | 3722 | 3712 | 3704 | 3697 | 3692 | 3687 | 3683 |
| 61 | γ Gem | 0.90 | 0.91 | 0.87 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 62 | α Cma | .89 | .86 | .84 | 0.82 | 0.84 | 0.84 | 0.76 | 0.64 | 0.56 | 0.47 | 0.35 | 0.22 | 0.11 | — | — | — |
| 63 | 2 Hya | .87 | .93 | .93 | .75 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 64 | z Hya | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 65 | ζ Leo | .74 | .75 | .73 | .70 | .74 | .71 | .67 | .65 | .63 | .60 | .52 | .40 | .38 | 0.27 | 0.26 | 0.19 |
| 66 | λ UMa | .88 | .84 | .86 | .82 | .85 | .85 | .80 | .73 | .63 | .59 | .52 | .37 | .27 | .22 | .15 | — |
| 67 | β UMa | .91 | .86 | .86 | .84 | .84 | .82 | .80 | .74 | .62 | .67 | .54 | .34 | .29 | .2 | .16 | .09 |
| 68 | γ Crv | .79 | .77 | .73 | .72 | .70 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 69 | η Vir | .87 | .80 | .82 | .80 | .77 | .76 | .70 | .70 | .67 | — | — | — | — | — | — | — |
| 70 | θ Vir | .98 | .95 | .92 | .90 | .90 | .90 | .90 | .86 | .82 | .80 | .70 | .60 | .56 | .50 | .50 | .30 |
| 71 | γ Boo | .70 | .64 | .70 | .62 | .65 | .64 | .52 | .52 | .49 | .42 | .38 | .29 | .23 | .15 | .17 | .13 |
| 72 | HR 5780 | .90 | .83 | .76 | .75 | .77 | .79 | .70 | .71 | .63 | .48 | .41 | .22 | .17 | .16 | .12 | — |
| 73 | β Ser | .72 | .76 | .79 | .71 | .70 | .69 | .62 | .59 | .52 | .28 | .38 | .36 | .20 | — | — | — |
| 74 | δ Her | .68 | .70 | .72 | .65 | .68 | .65 | .62 | .48 | .42 | .30 | .25 | .20 | .14 | .11 | .10 | — |
| 75 | μ Oph | .77 | .71 | .72 | .72 | .76 | .72 | .69 | .66 | .58 | .54 | .47 | .38 | .32 | .29 | .19 | — |
| 76 | γ Oph | .80 | .78 | .78 | .74 | .75 | .72 | .67 | .58 | .54 | .47 | .35 | .26 | .22 | .14 | — | — |
| 77 | α Lyr | .96 | .90 | .83 | .82 | .82 | .77 | .75 | .62 | .60 | .51 | .43 | .32 | .19 | .16 | .10 | — |
| 78 | ι Aql | .76 | .74 | .76 | .74 | .77 | .77 | .74 | .69 | .64 | .55 | .39 | .32 | .27 | .22 | .17 | .14 |
| 79 | δ Cyg | .71 | .70 | .71 | .70 | .72 | .69 | .66 | .60 | .50 | .43 | .35 | .27 | .19 | .11 | .07 | — |
| 80 | z Cep | .88 | .85 | .84 | .80 | .82 | .81 | .77 | .70 | .67 | .53 | .52 | .44 | .35 | .23 | .22 | 0.14 |
| 81 | 29 Vul | .82 | .80 | .78 | .74 | .80 | .77 | .71 | .60 | .48 | .43 | .30 | .20 | .12 | .12 | .09 | — |
| 82 | 28 Vul | .50 | .50 | .52 | .51 | .52 | .50 | .43 | .39 | .32 | .24 | .11 | .09 | .08 | — | — | — |
| 83 | δ Del | .82 | .80 | .85 | .77 | .77 | 0.80 | 0.72 | 0.70 | 0.62 | 0.57 | 0.49 | 0.44 | 0.38 | 0.30 | 0.29 | — |
| 84 | α Peg | 0.73 | 0.73 | 0.75 | 0.76 | 0.68 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |

чения $\lg n_e$ (H_γ , H_δ) введены поправки (по результатам работы [16]) за переналожение крыльев водородных линий и за влияние электронов на их расширение. В среднем электронные плотности в звездах Ар та-

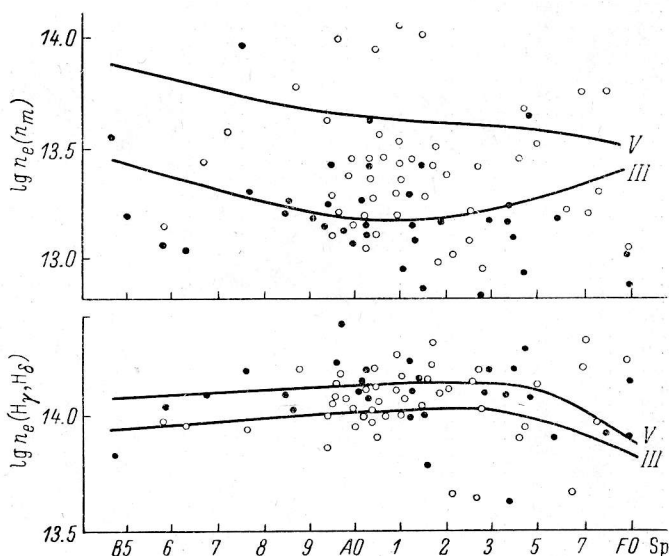


Рис. 2. Сопоставление зависимостей электронной плотности от спектрального класса.

Обозначения те же, что и на рис. 1.

кие же, как и в нормальных звездах; особенно хорошо совпадают величины $\lg n_e$ (H_γ , H_δ), характеризующие глубокие слои атмосфер. Это в какой-то степени свидетельствует о малости различий структур атмосфер

ТАБЛИЦА 3

Центральные глубины линий водорода и электронные плоскости

| № п/п | Название звезды | R_c | n_m | $\lg n_e (n_m)$ | $\lg N_{0.2} \text{ H}$ | $\lg n_e (\text{H}\gamma, \text{H}\delta)$ |
|-------|-------------------|-------|-------|-----------------|-------------------------|--|
| 1 | α And | 0.66 | 20.0 | 13.20 | 16.53 | 14.19 |
| 2 | HR 234 | — | 18.2 | 13.49 | 16.15 | — |
| 3 | 87 Psc | 0.75 | 20.1 | 13.18 | 16.62 | 14.12 |
| 4 | HR 465 | 0.86 | 18.0 | 13.54 | — | — |
| 5 | 43 Cas | 0.86 | 19.0 | 13.42 | 16.70 | 14.11 |
| 6 | 63 And | 0.72 | 17.0 | 13.77 | 16.65 | 14.23 |
| 7 | α Psc | 0.75 | 19.5 | 13.27 | 16.74 | 14.16 |
| 8 | ι Cas | 0.90 | 20.3 | 13.27 | 17.82 | 14.28 |
| 9 | 21 Per | 0.88 | 20.0 | 13.27 | 16.57 | 14.12 |
| 10 | SX Ari | 0.69 | 19.8 | 13.24 | 16.65 | 14.16 |
| 11 | HR 976 | 0.86 | 20.2 | 13.18 | 16.74 | 14.34 |
| 12 | ξ Tau | 0.62 | 16.1 | 13.96 | 16.63 | 14.21 |
| 13 | 41 Tau | 0.74 | 20.7 | 13.10 | 16.55 | 14.17 |
| 14 | θ^2 Tau | 0.75 | 19.0 | 13.43 | 16.75 | 13.76 |
| 15 | 68 Tau | 0.87 | 20.4 | 13.18 | 16.90 | — |
| 16 | μ Lep | 0.85 | 20.5 | 13.14 | 16.64 | 13.85 |
| 17 | β Tau | 0.60 | 18.5 | 13.69 | 16.52 | 14.03 |
| 18 | 27 Aur | 0.87 | 18.5 | 13.20 | 16.97 | 14.16 |
| 19 | 137 Tau | 0.83 | 19.5 | 13.36 | 16.89 | 14.03 |
| 20 | θ Aur | 0.75 | 18.5 | 13.41 | 16.56 | 14.09 |
| 21 | 53 Aur | 0.80 | 17.0 | 13.46 | 16.96 | — |
| 22 | HR 2534 | 0.85 | 18.5 | 13.44 | 16.87 | 14.00 |
| 23 | 3 Hya | — | 16.0 | 14.00 | 16.89 | — |
| 24 | z Cnc | — | 16.0 | 13.98 | 16.90 | — |
| 25 | 30 UMa | 0.86 | 19.1 | 13.40 | 16.81 | 14.40 |
| 26 | θ Leo | 0.86 | 21.0 | 13.07 | 16.83 | 14.16 |
| 27 | HR 4369 | 0.82 | 16.0 | 13.74 | 16.95 | 14.22 |
| 28 | 17 Com | — | 18.5 | 13.49 | 16.74 | 14.12 |
| 29 | 21 Com | 0.88 | 19.0 | 13.36 | 17.05 | 14.12 |
| 30 | HR 4816 | 0.86 | 17.5 | 13.65 | 16.97 | 13.95 |
| 31 | γ Vir | 0.86 | 17.0 | 13.74 | 16.29 | 13.92 |
| 32 | HR 4854 | 0.86 | 21.5 | 13.03 | 16.95 | 13.67 |
| 33 | ε UWa | 0.90 | 21.0 | 13.09 | 16.81 | 14.20 |
| 34 | α^2 CVn | 0.80 | 20.0 | 13.22 | 16.60 | 14.60 |
| 35 | 78 Vir | 0.86 | 21.0 | 13.07 | 16.89 | 13.58 |
| 36 | α Dra | 0.86 | 19.0 | 13.40 | 16.93 | 14.40 |
| 37 | CU Vir | — | 18.2 | 13.56 | 16.58 | — |
| 38 | π Boo | 0.80 | 19.5 | 13.36 | 16.58 | 14.06 |
| 39 | γ UMi | 0.82 | 20.0 | 13.20 | 16.79 | 13.65 |
| 40 | β CrB | 0.83 | 21.5 | 12.95 | 16.74 | 14.24 |
| 41 | ι CrB | 0.86 | 17.5 | 13.62 | 16.70 | 14.00 |
| 42 | ω Her | 0.88 | 21.0 | 13.05 | 16.97 | 14.01 |
| 43 | 45 Her | 0.85 | 15.6 | 14.04 | 16.20 | 14.05 |
| 44 | 52 Her | 0.88 | 19.0 | 13.40 | 17.00 | 14.23 |
| 45 | HR 6326 | 0.93 | 19.7 | 13.28 | 17.00 | 13.98 |
| 46 | HR 7058 | 0.94 | 16.2 | 13.93 | 16.68 | 13.90 |
| 47 | 112 Her | 0.86 | 18.2 | 13.61 | 16.72 | 13.97 |
| 48 | 10 Aql | 0.90 | 22.0 | 13.15 | 16.90 | 14.33 |
| 49 | 21 Aql | — | 20.5 | 13.17 | 16.95 | — |
| 50 | 4 Cyg | 0.76 | 19.7 | 13.44 | 16.58 | 14.04 |
| 51 | HR 7575 | 0.95 | 19.2 | 13.43 | 16.86 | 13.92 |
| 52 | 73 Dra | 0.94 | 22.0 | 12.94 | 16.86 | 14.04 |
| 53 | γ Equ | 0.90 | 20.0 | 13.50 | 16.85 | 14.14 |
| 54 | HR 8216 | 0.88 | 21.8 | 12.96 | 16.95 | 14.10 |
| 55 | 38 Aqr | 0.80 | 19.5 | 13.14 | 16.74 | 14.00 |
| 56 | CG And | 0.80 | 20.5 | 13.17 | 16.68 | 13.96 |
| 57 | β Tri | 0.80 | 21.9 | 12.92 | 16.95 | 14.30 |
| 58 | γ Cet | 0.74 | 20.3 | 13.17 | 16.89 | 14.21 |
| 59 | η Tau | 0.64 | 19.3 | 13.43 | 16.13 | 14.09 |
| 60 | HR 1242 | 0.90 | 20.7 | 13.16 | 16.73 | 13.88 |
| 61 | γ Gem | 0.91 | 19.9 | 13.27 | 17.02 | 14.25 |
| 62 | α CMa | 0.88 | 19.5 | 13.15 | 16.84 | 14.11 |

| № п/п | Название звезды | R_c | n_m | $\lg n_e (n_m)$ | $\lg N_{0.2} H$ | $\lg n_e (H_\gamma, H_\delta)$ |
|-------|-----------------|-------|-------|-----------------|-----------------|--------------------------------|
| 63 | α Hya | 0.93 | 17.0 | 13.64 | 16.85 | 14.08 |
| 64 | α Hya | 0.60 | 18.4 | 13.55 | 16.70 | — |
| 65 | ξ Leo | 0.74 | 22.4 | 12.86 | 16.46 | 13.90 |
| 66 | λ UMa | 0.87 | 20.4 | 13.18 | 16.90 | — |
| 67 | β UMa | 0.85 | 23.7 | 12.72 | 16.90 | 14.10 |
| 68 | γ Crv | 0.79 | 19.0 | 13.42 | 16.96 | 14.04 |
| 69 | η Vir | 0.87 | 23.5 | 12.85 | 16.80 | 14.02 |
| 70 | θ Vir | 0.95 | 22.1 | 12.94 | 16.87 | 14.00 |
| 71 | γ Boo | 0.79 | 21.5 | 13.00 | 16.73 | 14.16 |
| 72 | HR 5780 | 0.80 | 21.6 | 13.02 | 16.64 | 13.96 |
| 73 | β Ser | 0.75 | 20.8 | 13.08 | 16.93 | 14.20 |
| 74 | δ Her | 0.70 | 20.5 | 13.18 | 16.85 | 14.09 |
| 75 | μ Oph | 0.77 | 20.0 | 13.28 | 16.82 | — |
| 76 | γ Oph | 0.80 | 21.0 | 13.11 | 16.97 | 14.42 |
| 77 | α Lyr | 0.90 | 20.0 | 13.26 | 16.88 | 14.17 |
| 78 | ι Aql | 0.76 | 21.7 | 13.06 | 16.59 | 14.04 |
| 79 | δ Cyg | 0.71 | 20.4 | 13.25 | 16.72 | 14.11 |
| 80 | α Cep | 0.85 | 21.2 | 13.05 | 16.85 | 14.09 |
| 81 | 29 Vul | 0.80 | 21.0 | 13.09 | 16.90 | 14.09 |
| 82 | 28 Vul | 0.52 | 19.6 | 13.19 | 16.49 | — |
| 83 | δ Del | 0.85 | 20.2 | 13.23 | 16.55 | 13.85 |
| 84 | α Peg | 0.75 | 20.3 | 13.21 | 16.82 | 14.29 |

пекулярных и нормальных звезд. Однако разница в структурах все же существует, о чем свидетельствует такой факт. Электронные плотности, определенные по линиям H_γ и H_δ — $\lg n_e (H_\gamma, H_\delta)$, — относятся к более глубоким слоям атмосферы, чем электронные плотности, определенные по номеру последней линии бальмеровской серии — $\lg n_e (n_m)$. Разность между этими величинами должна характеризовать различие физических условий в слоях, к которым относятся эти параметры. Мы вычислили

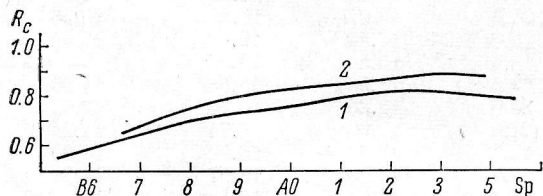


Рис. 3. Средние кривые зависимостей значений R_c от спектрального класса Sp для нормальных (1) и пекулярных (2) звезд.

среднее значение разности $\Delta \lg n_e = \lg n_e (H_\gamma, H_\delta) - \lg n_e (n_m)$ для всего спектрального интервала, занимаемого исследуемыми звездами, отдельно для пекулярных и нормальных звезд. В первом случае эта разность составляет $\Delta \lg n_e (Ap) = 0.74$, во втором случае $\Delta \lg n_e (норм.) = 0.96$. Таким образом, падение электрон-

ной плотности в звездах Ap для рассматриваемых слоев в 1.7 раза меньше, чем в нормальных звездах. Если это различие вызвано разной степенью ионизации водорода, то соответствующее падение температуры для пекулярных звезд в 1.03 раза меньше, чем для нормальных (температурный градиент понижен). Для звезды с температурой 10 000° К эта разница составляет 300°.

На рис. 3 даны средние кривые зависимостей максимальных центральных глубин (R_c) от спектрального класса для пекулярных и нормальных звезд. Величины R_c для нормальных звезд во всем спектральном интервале, занимаемом этими звездами, в среднем на 0.07 меньше значений R_c для звезд Ap.

3. ВЫВОДЫ И ИНТЕРПРЕТАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ

На основании вышесказанного мы можем сделать следующие выводы.

1. Зависимость эквивалентных ширин водородных линий от S_p у пекулярных звезд ранних спектральных классов (до A1—A2) отличается от таковой у нормальных звезд. Средняя кривая W_λ — S_p для Ар-звезд сдвинута в сторону поздних спектральных классов примерно на один подкласс (различия температур составляет примерно 1000—1500° К).

2. У пекулярных звезд спектральных классов A2 и более поздних эквивалентные ширины линий H_γ и H_β на 10—15% больше, чем у нормальных.

3. Глубина водородных линий в спектрах звезд Ар несколько больше (примерно на 0.07), чем в спектрах нормальных звезд.

4. Различия электронных плотностей $\lg n_e$ в атмосферах пекулярных и нормальных звезд очень малы, но имеют место. Электронные плотности в верхних слоях пекулярных звезд несколько выше, чем у нормальных.

5. Разность $\Delta \lg n_e = \lg n_e (H_\gamma, H_\beta) - \lg n_e (n_m)$ для нормальных звезд в среднем на 0.22 больше, чем для пекулярных.

Полученные эффекты не являются ошибками наведения контуров водородных линий на регистрограммах, так как подобные ошибки должны оказывать одинаковое влияние на пекулярные и нормальные звезды. Кроме того, реальность этих различий подтверждается сопоставлением наших результатов с результатами других авторов.

Рассмотренные различия можно объяснить следующими причинами.

1. Можно было бы объяснить их различием светимостей (M_v) пекулярных и нормальных звезд (так называемый эффект светимости). Однако величины M_v определены по тригонометрическим параллаксам [13], и значения $\lg n_e$ свидетельствуют как будто о равенстве, в среднем, абсолютных величин исследуемых нормальных и пекулярных звезд.

2. Уменьшение эквивалентных ширин водородных линий может быть вызвано дополнительным источником поглощения в атмосферах пекулярных звезд по сравнению с нормальными. Таким источником может быть поглощение металлами, обилие которых в значительной степени повышено в атмосферах звезд Ар по сравнению с нормальным содержанием. Одним из главных поглощающих агентов может быть кремний, количество которого в некоторых звездах Ар больше, чем гелия [17].

На рис. 4 приведены теоретические зависимости W_λ линий H_γ от эффективной температуры при различном содержании кремния в атмосфере звезды, построенные по результатам [18]. Как видно из этих графиков, эквивалентные ширины при увеличенном содержании кремния в звездах ранних спектральных классов уменьшены, а в звездах спектрального класса A2 не зависят от его содержания. Начиная от спектрального класса A2, с увеличением содержания кремния W_λ и $\Delta\lambda$ водородных линий увеличиваются. Это, вероятно, происходит по следующей причине. Выражение для коэффициента поглощения в водородной линии имеет вид

$$k_\lambda = [C \cdot l^2 n / (\lambda - \lambda_0)^{5/2}] \cdot [1 + R(n_e, T) (\lambda - \lambda_0)^{1/2}],$$

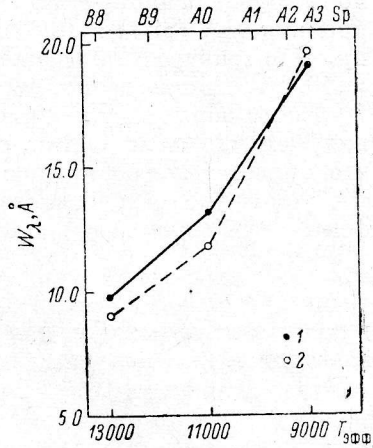


Рис. 4. Зависимость W_λ линий H_γ от эффективной температуры при различном содержании кремния.

1 — $\lg N(\text{Si})_* - \lg N(\text{Si})_\odot = 0$; 2 — $\lg N(\text{Si})_* - \lg N(\text{Si})_\odot = 2.0$.

где n — число ионов в 1 см^3 , создающих электрическое микрополе. Отсюда следует, что если это число будет существенно увеличено для каких-либо звезд, то возрастет ширина контура водородной линии, а следовательно, и эквивалентная ширина.

Рассмотрим условия, при которых n может существенно возрасти. В звездах ранних спектральных классов (примерно до A1—A2) основным поставщиком ионов является водород, в звездах же поздних спектральных классов сравнимое число ионов могут давать другие элементы. Действительно, если мы рассмотрим звезду с содержанием водорода $\lg N(\text{H})=12.0$ и кремния $\lg N(\text{Si})=10.6$, то при температуре 9000°K число водородных ионов будет равно $\lg N(\text{H II})=11.3$, что значительно больше числа ионов кремния $\lg N(\text{Si II})=10.6$ (кремний практически весь ионизован), но уже при температуре 8500°K число водородных ионов снизится до $\lg N(\text{H II})=10.4$, т. е. ионов водорода становится даже меньше, чем ионов кремния.

Таким образом, у пекулярных звезд спектральных классов более поздних, чем A2, число частиц, создающих микрополе, может быть увеличено, что приведет к расширению контура и росту W_λ . Можно грубо оценить требуемое увеличение числа частиц, чтобы получился наблюдаемый эффект. Если взять выражение для контура линии в виде

$$r_\lambda = 1/(1 + k_\lambda/N)$$

и подставить выражение для коэффициента поглощения (без учета влияния электронов), то получим

$$r_\lambda = 1/(1 + A \cdot n/\Delta\lambda^{5/2}).$$

Отсюда для сильных линий (H_γ и H_δ в нашем случае) можно записать

$$\Delta\lambda = [A \cdot r_\lambda/(1 - r_\lambda)]^{2/5} n^{2/5}$$

и

$$W_\lambda \sim n^{2/5}.$$

Из этих соотношений следует, что для увеличения W_λ и $\Delta\lambda$ на 15% (при прочих равных условиях) надо, чтобы число ионов было увеличено в 1.5 раза, т. е. для звезды с температурой 8500°K необходимо, чтобы число ионизованных атомов кремния составляло $\lg N(\text{Si II})=10.2$, что для пекулярных звезд вполне реально [17]. Так можно качественно объяснить наблюдаемые эффекты учетом аномалий в химическом составе. Для объяснения увеличения W_λ и $\Delta\lambda$ водородных линий в пекулярных звездах этого вполне достаточно. Уменьшение же W_λ и $\Delta\lambda$ в звездах Ap ранних спектральных классов рассмотренным механизмом не объясняется. Здесь, возможно, какую-то роль играет так называемый back warming effect, который состоит в перегреве нижних слоев по сравнению с верхними из-за включения дополнительных источников поглощения [19]. Поскольку наши спектральные классы определены по линиям поглощения металлов, то они характеризуют температуры тех слоев атмосферы, где образуются эти линии. Последние, в свою очередь, экранируют выходящий поток лучистой энергии, подогревая нижележащие области атмосферы и охлаждая вышележащие. Так как линии водородного спектра образуются в эффективно более глубоких слоях, чем линии поглощения металлов, то получится, что линии водорода характеризуют более горячую атмосферу, и поэтому они ослаблены, а линии металлов — более холодную, и поэтому они усилены. В результате получается сдвиг, показанный на рис. 1.

Численные оценки подтверждают наше предположение. Действительно, покровной эффект металлических линий в пекулярных звездах составляет 15—20% [19]. Следовательно, в изотермической атмосфере с $T=10\,000^\circ \text{K}$

повышение температуры нижележащих слоев за счет покровного эффекта будет составлять 500° , и, таким образом, при построении зависимости W_λ и $\Delta\lambda$ от спектрального класса у пекулярных звезд необходимо исправлять значение спектрального класса в сторону более ранних классов на величину ΔSp (соответствующую 500°), обусловленную покровным эффектом, кроме того, войдет какая-то поправка из-за охлаждения слоев, в которых образуется металлический спектр (при предположении, что он образуется выше водородного, хотя такое предположение мало вероятно).

Оставшаяся разница между кривыми на рис. 1 (порядка 500°) может быть объяснена, как рассматривалось выше, влиянием непрерывного поглощения атомами кремния.

3. Меньшую интенсивность излучения в центре линий водорода (большее значение R_0) в звездах Ap, вероятно, можно объяснить наличием увеличенного покровного эффекта. Действительно, слой, эффективно поглощающий в линиях металлов, должен несколько охладить вышележащие слои атмосферы, которые дают излучение в центре линий водорода, и таким образом уменьшить интенсивность этого излучения.

4. Различие в $\Delta \lg n_e$ для пекулярных и нормальных звезд можно объяснить неодинаковой степенью ионизации рассматриваемых слоев в пекулярных и нормальных звездах, что, вероятно, обусловлено уменьшенным температурным градиентом в звездах Ap. Однако существует еще одна причина, которая может объяснить этот факт. Если последние определяемые линии серии Бальмера эффективно образуются в тех же слоях, где и линии металлов, а обилие последних там повышено, то в этих слоях возможно увеличение электронной плотности за счет ионизации металлов (например, кремния). Это увеличение, по нашим расчетам (см. п. 2), может достигать до 1.5—2 раз, т. е. до нужной величины. Понятно, что в пекулярных звездах разных типов рассмотренные механизмы играют различную роль.

Если в нашем исследовании вместо количественных спектральных классов использовать эффективные температуры, полученные выводы принципиально не изменятся. Правда, сразу можно сказать, что эффективная температура, полученная по характеристикам водородного спектра (по распределению энергии в спектре звезды, по контурам водородных линий) и таким образом связанная с показателями цвета $B-V$ и $U-B$, сдвинет кривую для пекулярных звезд на рис. 1 в сторону кривой для нормальных, если взять вместо спектрального класса температуру. Это следует из сопоставления спектральных классов с показателями цвета $B-V$ и $U-B$ [13]. С другой стороны, эффективная температура не является равнозначной характеристикой для пекулярных и нормальных звезд так, как структуры атмосфер тех и других звезд различны [4]. Различие структур следует из избыточного содержания и неоднородного распределения металлов в атмосферах пекулярных звезд.

Таким образом, один основной факт, наличие которого подтверждается многочисленными наблюдениями звезд Ap, а именно — повышенное по сравнению с нормальным содержание легко ионизируемых элементов в верхних слоях атмосфер пекулярных звезд, может объяснить весь комплекс различий характеристик атмосфер (полученных по водородным линиям) пекулярных и нормальных звезд.

Литература

1. H. J. Wood, Publ. Astron. Soc. Pacific, 76, 158, 1964.
2. H. J. Wood, in The Magnetic and Related Stars. Ed. R. Cameron, Mono—Book Corp., Baltimore, 1967, p. 485.
3. H. J. Wood, G. W. Lockwood, C. Doremus, Astron. J., 73, No. 5, 124, 1968.

4. Ю. В. Глаголевский, К. И. Козлова, *Астрофизика*, 3, 367, 1967.
5. К. И. Козлова, *Астрофиз. исслед. (Изв. САО)*, 2, 18, 1970.
6. Р. Н. Кумайгородская, *Астрофиз. исслед. (Изв. САО)*, 2, 26, 1970.
7. R. Faraggiapa, M. Nask, *Mem. Soc. Astron. Ital.*, 33, 4, 1967.
8. Э. Р. Мустель, Л. С. Галкин, *Изв. Крымск. астрофиз. obs.*, 22, 225, 1960.
9. Э. Р. Мустель, Л. С. Галкин, *Изв. Крымск. астрофиз. obs.*, 24, 78, 1960.
10. L. Searle, W. L. W. Sargent, *Astrophys. J.*, 139, 793, 1964.
11. M. Nask, *Vistas in Astronomy*, 7, 107, 1966.
12. В. В. Леушин, *Изв. Крымск. астрофиз. obs.*, 39, 108, 1969.
13. В. В. Леушин, *Изв. Крымск. астрофиз. obs.*, 43, 113, 1971.
14. В. В. Леушин, *Астрофиз. исслед. (Изв. САО)*, 3, 36, 1971.
15. И. М. Копылов, *Изв. Крымск. астрофиз. obs.*, 26, 232, 1961.
16. И. М. Копылов, *Изв. Крымск. астрофиз. obs.*, 35, 11, 1966.
17. W. L. W. Sargent, *Ann. Rev. Astron. Astrophys.*, 2, 297, 1964.
18. D. M. Peterson, *Astrophys. J.*, 161, 685, 1970.
19. S. C. Wolff, *Astrophys. J. Suppl.*, 15, 21, 1967.

Декабрь 1971 г.
