

## СТРАТИФИКАЦИЯ ФОСФОРА В АТМОСФЕРЕ ХИМИЧЕСКИ ПЕКУЛЯРНОЙ В-ЗВЕЗДЫ HR 1512

Л.С.ЛЮБИМКОВ, Д.Б.ПОКЛАД, Т.М.РАЧКОВСКАЯ

Поступила 25 октября 2007

Принята к печати 13 февраля 2008

Показано, что ряд эмпирических зависимостей свидетельствует о росте содержания фосфора  $\log_e(P)$  с высотой в атмосфере HR 1512. Сюда относятся: а) корреляция  $\log_e(P)$  с наблюдаемой эквивалентной шириной  $W_{\lambda}$  линий PII; б) корреляция  $\log_e(P)$  с длиной волны линий; в) систематическое расхождение в значениях  $\log_e(P)$  между линиями с разными потенциалами возбуждения  $E_i$ , а именно: линиям с меньшими  $E_i$  соответствует в среднем более высокое содержание  $\log_e(P)$ ; г) четкая зависимость  $\log_e(P)$  от средней геометрической высоты образования  $H_f$ . Кроме того, при предположении о постоянстве  $\log_e(P)$  в атмосфере звезды получается систематическое расхождение между вычисленными эквивалентными ширинами  $W_{\lambda}$  и наблюдаемыми величинами  $W_{\lambda}$ . Методом проб и ошибок мы выбрали такое распределение содержания фосфора  $\log_e(P)$  по высоте  $H$ , при котором отсутствует систематическое различие между  $W_{\lambda}$  и  $W_{\lambda}$ . Однако оказалось, что к такому же хорошему согласию между  $W_{\lambda}$  и  $W_{\lambda}$  приводит и более простое - ступенчатое - распределение  $\log_e(P)$ . Несмотря на неоднозначность решения, оба распределения имеют общие черты, а именно: 1) крутой подъем  $\log_e(P)$  происходит в одной и той же области высот  $H$ , которой соответствуют оптические глубины  $\tau_{500} \approx 10^{-2} - 10^{-1}$ , т.е. стратификация фосфора имеет место в достаточно высоких слоях атмосферы HR 1512; 2) верхняя граница  $\log_e(P) = 8.9$  в обоих случаях одна и та же, так что в области подъема происходит повышение  $\log_e(P)$  на 3.4 dex. Сравнение с имеющимися данными для звезд типов HgMn, Am и Ap показало, что у других CP-звезд наблюдаются близкие по величине крутые изменения в содержаниях  $\log_e$  некоторых элементов, причем примерно на тех же оптических глубинах или даже в более высоких слоях атмосферы.

**Ключевые слова:** *звезды химически пекулярные: содержания: стратификация*

1. *Введение.* Для химически пекулярных звезд (CP-звезд) спектральных классов A и B, т.е. для магнитных Ap-звезд, "металлических" Am-звезд и HgMn-звезд, характерен дефицит одних и избыток других химических элементов (детали см., например, в [1]). Мишо [2] впервые предложил объяснять такие аномалии диффузией атомов в достаточно стабильных атмосферах CP-звезд под действием двух противоположно направленных сил - гравитации и радиативного давления. Из теории диффузии, завоевавшей широкую популярность, следовало, что содержание ряда элементов может существенно зависеть от высоты в атмосфере, т.е. такие элементы должны обнаруживать стратификацию.

Напомним, что в качестве содержания какого-либо элемента El обычно рассматривают величину  $\log_e(EI) = \log N(EI)/N(H) + 12.00$ , где  $N(EI)$  и  $N(H)$  - концентрации атомов элемента El и водорода H,

соответственно. Для водорода, наиболее обильного элемента в атмосферах большинства звезд, принято  $\log \epsilon(\text{H}) = 12.00$ . Плотность в звездной атмосфере растет с глубиной, соответственно увеличиваются с глубиной и концентрации  $N(\text{El})$  и  $N(\text{H})$ . Однако при этом отношение  $N(\text{El})/N(\text{H})$ , как считалось долгое время, должно оставаться постоянным. Тем не менее, возможны случаи, когда  $N(\text{El})/N(\text{H})$  меняется с глубиной в атмосфере; это явление и стали называть стратификацией.

Из наблюдений CP-звезд для некоторых химических элементов действительно была найдена стратификация. В качестве примера можно указать работы Саванова и др. [3,4] и Саванова и Хубриг [5], где для звезд трех перечисленных выше типов - Ar, Am и HgMn - было исследовано вертикальное распределение хрома. В [3-5] ко всем звездам был применен единый метод, а именно: анализировались 8 линий 30-го мультиплета CrII в крыльях сильной бальмеровской линии H $\beta$  и искалась зависимость содержания хрома  $\log \epsilon(\text{Cr})$  от расстояния  $\Delta \lambda$  до центра H $\beta$ . Так как линии CrII с разными  $\Delta \lambda$  формируются на разных уровнях в атмосфере (чем меньше  $\Delta \lambda$ , тем выше образуется линия), полученная зависимость  $\log \epsilon(\text{Cr})$  от  $\Delta \lambda$  отражала реальный ход содержания хрома с высотой. Аппроксимация этой зависимости прямой линией показала, что, например, в случае HgMn-звезд наблюдаемое повышение  $\log \epsilon(\text{Cr})$  достигает 0.7 dex [5].

К HgMn-звездам, для которых характерны эффективные температуры  $T_{\text{eff}}$  от 11000 до 14000 К, примыкает немногочисленная группа несколько более горячих CP-звезд с ослабленными линиями гелия (He-weak stars), для которых проблема стратификации элементов, насколько нам известно, практически не исследована. В нашей недавней работе [6] был изучен химический состав звезды HR 1512, принадлежность которой к типу He-weak была установлена в [7]. Для нее был обнаружен значительный избыток фосфора - около 1.6 dex в среднем, т.е. повышение в 40 раз относительно Солнца (отсюда был сделан вывод, что звезда принадлежит к подтипу PGa). Было высказано предположение, что содержание фосфора (а также гелия, см. [6]) растет с высотой в атмосфере звезды. В настоящей работе мы исследуем проблему стратификации фосфора у HR 1512 более подробно. Напомним, что звезде HR 1512 соответствуют эффективная температура  $T_{\text{eff}} = 15200$  К, ускорение силы тяжести в атмосфере  $\log g = 3.52$  и параметр микротурбулентности  $V_t = 1.5$  км/с [6]. Именно эти величины приняты в дальнейших расчетах.

2. *Свидетельства стратификации фосфора.* Мы несколько уточнили содержания фосфора  $\log \epsilon(\text{P})$ , определенные по линиям PII в [6]. Во-первых, из 19 линий PII, использованных в [6], была исключена линия 4602.07 Å, так как она заметно выпадала из общих зависимостей, обсуждаемых ниже. Эквивалентная ширина этой линии измеряется

уверенно, и мы предполагаем, что причиной расхождений явилось завышение силы осциллятора  $\log gf$  для 4602.07 Å примерно на 0.1 dex и, как следствие, занижение на ту же величину  $\log \epsilon(\text{P})$ . Во-вторых, для всех линий была уточнена величина штарковского загухания по последней версии базы данных VALD [8]. Это привело к некоторому изменению индивидуальных значений  $\log \epsilon(\text{P})$  по отдельным линиям, однако среднее содержание фосфора изменилось по сравнению с [6] всего лишь на 0.01 dex и составило  $\log \epsilon(\text{P}) = 7.08 \pm 0.29$  (старое значение  $\log \epsilon(\text{P}) = 7.08 \pm 0.32$  [6]). В табл.1 приведен список 18 линий PII, их потенциалы возбуждения нижнего уровня  $E_i$  и силы осцилляторов  $\log gf$  согласно данным NIST [9], а также наблюдаемые эквивалентные ширины  $W_{obs}$  в mÅ и найденное нами содержание фосфора  $\log \epsilon(\text{P})$ .

Таблица 1

ПАРАМЕТРЫ ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ЛИНИЙ PII И  
СОДЕРЖАНИЕ ФОСФОРА

Линия	$E_p$ eV	$\log gf$	$W_{obs}$ mÅ	$\log \epsilon(\text{P})$
4420.71	11.02	-0.33	29	6.87
4475.27	13.09	0.44	20	6.64
4499.23	13.38	0.47	25	6.88
4588.03	12.81	0.58	33	6.71
4589.85	12.79	0.40	27	6.75
4626.71	12.81	-0.32	6	6.68
4943.50	12.85	0.06	18	6.91
5253.48	11.02	0.32	70	7.28
5296.08	10.80	-0.16	57	7.32
5409.72	10.76	-0.39	42	7.19
5425.88	10.80	0.18	72	7.19
5450.74	13.09	-0.13	14	7.13
6024.18	10.76	0.14	82	7.59
6034.04	10.74	-0.22	56	7.44
6043.08	10.80	0.42	90	7.46
6055.50	13.38	0.06	12	7.05
6087.84	10.76	-0.35	40	7.23
6165.60	10.80	-0.34	34	7.10

На рис. 1а представлена зависимость  $\log \epsilon(\text{P})$  от эквивалентной ширины  $W_{obs}$  линий PII. Как уже отмечалось в [6], между этими величинами наблюдается корреляция, а именно: линии с  $W_{obs} < 40$  mÅ показывают относительно низкое (тем не менее, повышенное относительно Солнца) содержание фосфора, в то время как более сильные линии с  $W_{obs} = 40 - 90$  mÅ дают избыток, растущий с увеличением  $W_{obs}$ . Согласно [6], такой тренд величины  $\log \epsilon(\text{P})$  невозможно объяснить ошибкой в параметре микротурбулентности  $V_t$ . Действительно, чтобы устранить тренд, вместо параметра  $V_t = 1.5$  км/с, найденного в [6] по линиям FeII,

пришлось бы принять сильно завышенное значение  $V_i = 9$  км/с. Так как чем сильнее линия, тем выше она формируется в атмосфере, мы приходим к заключению, что рис. 1a отражает реальный рост содержания фосфора с высотой.

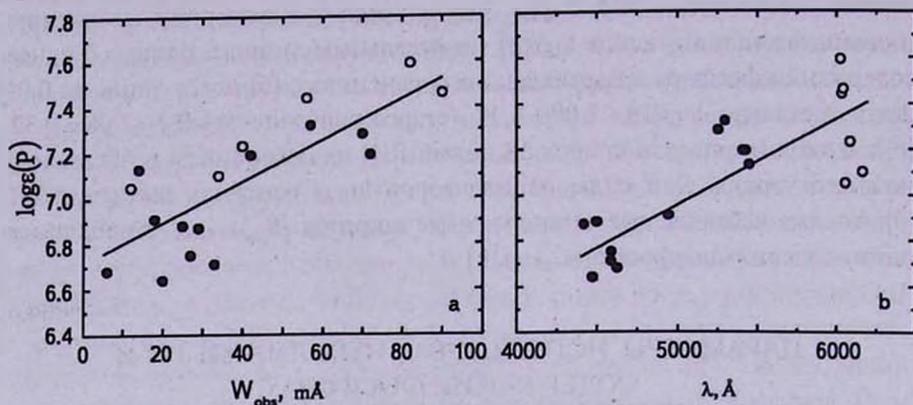


Рис. 1. Содержание фосфора как функция а) наблюдаемой эквивалентной ширины  $W_{obs}$  и б) длины волны  $\lambda$  линий PII. Прямые проведены методом наименьших квадратов. Открытыми кружками представлены линии PII в узком интервале  $\lambda$  между 6000 и 6200 Å.

На рис. 1b представлена зависимость  $\log_e(P)$  от длины волны  $\lambda$  линий. И в этом случае наблюдается явный тренд величины  $\log_e(P)$ , т.е. содержание фосфора демонстрирует тенденцию к повышению с ростом  $\lambda$ . Это объясняется прежде всего тем, что имеются систематические различия в наблюдаемых эквивалентных ширинах  $W_{obs}$  у линий с разными  $\lambda$ . С одной стороны, как видно из табл. 1, все линии с  $\lambda < 5000 \text{ \AA}$  относительно слабы ( $W_{obs} = 6 - 33 \text{ m\AA}$ ) и, следовательно, образуются сравнительно глубоко в атмосфере звезды. С другой стороны, большинство линий с  $\lambda > 5200 \text{ \AA}$  заметно сильнее (для 9 из 11 линий  $W_{obs} = 34 - 90 \text{ m\AA}$ ), т.е. они образуются в более высоких слоях атмосферы. Таким образом, рис. 1b отчасти является следствием рис. 1a. Дополнительный эффект дает то обстоятельство, что непрозрачность атмосферы в континууме заметно растет с длиной волны. Например, на тех высотах  $H$ , где имеет место стратификация (см. ниже), непрозрачность возрастает в 1.8 раза при увеличении  $\lambda$  от 4400 до 6200 Å. Это означает, что линии PII в красной области спектра образуются заметно выше, чем линии с такими же эквивалентными ширинами  $W_{obs}$  в синей области.

Отметим, что разброс точек на рис. 1b около прямой линии, проведенной методом наименьших квадратов, объясняется прежде всего различием в  $W_{obs}$ . Это видно на примере шести точек в узком интервале  $\lambda$  между 6000 и 6200 Å (открытые кружки), которые на рис. 1b дают существенный разброс, но на рис. 1a показывают достаточно монотонную

зависимость от  $W_{\text{obs}}$ .

Согласно Рябчиковой и др. [10], одним из признаков стратификации элемента может быть систематическое различие в его содержании  $\log \epsilon$  между линиями с разными потенциалами возбуждения  $E_i$ . На рис.2 представлена зависимость  $\log \epsilon(P)$  от  $E_i$  для исследованных линий РП. Видим, что все линии четко разделяются на две группы по величине  $E_i$ , а именно:  $E_i = 10.7 - 11.0 \text{ eV}$  и  $E_i = 12.8 - 13.4 \text{ eV}$ . В каждой группе имеется достаточно большой разброс значений  $\log \epsilon(P)$  - порядка 0.5 dex, обусловленный главным образом различиями в  $W_{\text{obs}}$ . Однако при этом первая группа линий показывает систематически более высокие содержания

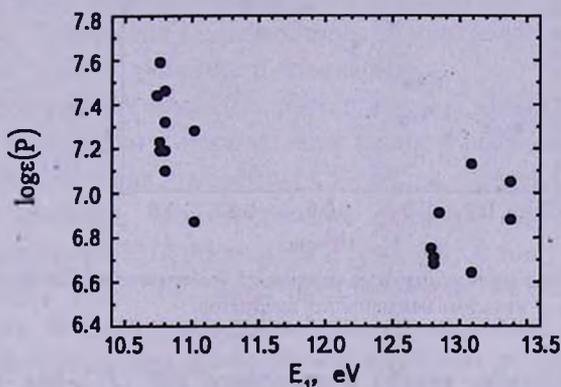


Рис.2. Содержание фосфора как функция потенциала возбуждения  $E_i$  нижнего уровня.

$\log \epsilon(P)$ , чем вторая группа. Линии с более высокими потенциалами возбуждения  $E_i$  требуют для своего образования и более высоких температур, т.е. они формируются в более глубоких слоях. Таким образом, рис.2 тоже свидетельствует об увеличении содержания фосфора с высотой в атмосфере HR 1512.

При определении содержания  $\log \epsilon(P)$  для каждой линии РП из табл.1 мы вычисляли среднюю оптическую глубину образования  $\tau_W$  ее эквивалентной ширины. При вычислении  $\tau_W$  использовался метод, описанный в [11]. Затем по модели атмосферы HR 1512 для каждого значения  $\tau_W$  была определена соответствующая геометрическая высота формирования  $H_i$  в атмосфере звезды. Принято, что высота  $H = 0$  соответствует уровню  $\tau_{5000} = 1$ , где  $\tau_{5000}$  - оптическая глубина в континууме на длине волны  $\lambda = 5000 \text{ \AA}$ . На рис.3 представлена зависимость  $\log \epsilon(P)$  от высоты формирования  $H_i$  исследованных линий. Прямая линия, проведенная методом наименьших квадратов, демонстрирует отчетливую корреляцию между  $\log \epsilon(P)$  и  $H_i$  (коэффициент корреляции равен 0.93). Зависимость  $\log \epsilon(P)$  от высоты образования линий является наиболее прямым свидетельством роста содержания фосфора с высотой. Отметим,

что профиль линии формируется в довольно протяженной области атмосферы, поэтому средняя глубина образования  $\tau_{\text{ли}}$  является достаточно условной величиной. На этом основании можно считать, что рис.3 дает лишь качественное представление о соотношении высот формирования исследованных линий РII, т.е. какая из них образуется выше, а какая - глубже. В количественном же отношении рис.3 может не соответствовать

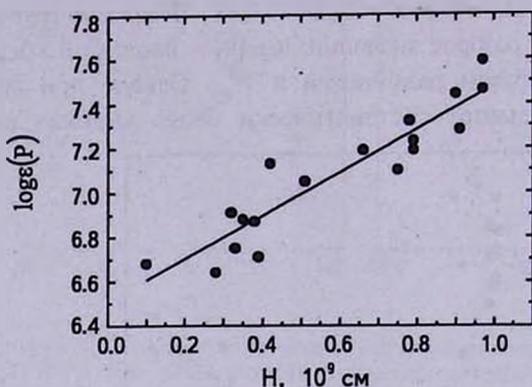


Рис.3. Зависимость содержания фосфора от средней геометрической высоты образования линий. Прямая проведена методом наименьших квадратов.

реальному распределению  $\log \epsilon(P)$  в атмосфере HR 1512 (см. ниже).

В принципе, на зависимости, изображенные на рис.1-3, могли повлиять некоторые неопределенности в расчетах линий РII, например, систематические ошибки в силах осцилляторов  $\log gf$ . Как отмечено выше, мы использовали значения  $\log gf$  из базы данных NIST [9]. Можно сравнить их со значениями  $\log gf$  из базы VALD [8]; важно, что данные [8] и [9] для линий РII основаны на разных, независимых источниках. Такое сравнение показало, что различия в  $\log gf$  колеблются от 0.00 до 0.15 dex, т.е. они сравнимы с ошибкой определения  $\log gf$ , составляющей в [8] и [9] около 0.10 dex. Таким образом, неопределенности в силах осцилляторов никак не могут объяснить полученные вариации содержания фосфора  $\log \epsilon(P)$ , достигающие почти порядка величины (см. табл.1 и рис.3).

В расчетах линий РII сначала мы использовали модель атмосферы, рассчитанную в [6] для нормального химического состава. (Напомним, что модель была вычислена по программе ATLAS9 Куруца [12] в соответствии с указанными выше параметрами  $T_{\text{эф}} = 15200$  К и  $\log g = 3.52$ .) Однако исследуемая звезда имеет пекулярный химический состав. Это обстоятельство, вообще говоря, также могло повлиять на  $\log \epsilon(P)$ . Мы пересчитали модель атмосферы HR 1512, приняв аномальное содержание элементов, найденное нами в [6]. Оказалось, что содержание  $\log \epsilon(P)$  меняется очень мало - на

несколько сотых для отдельных линий и на 0.01 в среднем.

Итак, мы рассматриваем зависимости, представленные на рис.1-3, как эмпирическое подтверждение стратификации фосфора в атмосфере звезды HR 1512. Возникает вопрос о подборе такого распределения  $\log \epsilon(P)$  по высоте  $H$ , которое могло бы объяснить наблюдаемые корреляции.

3. *Подбор распределения  $\log \epsilon(P)$  по высоте в атмосфере.* Расчеты линий PII проводились нами с помощью программы DASA, первоначально описанной в [11] и позже усовершенствованной. В ней было заложено условие постоянства содержаний  $\log \epsilon$  всех элементов по глубине. Теперь мы модифицировали программу, введя возможность изменения  $\log \epsilon$  с высотой в атмосфере.

Если содержание элемента растет наружу, можно предположить, что этот рост начинается с нормального (солнечного) содержания в относительно глубоких слоях атмосферы CP-звезды. Следуя такому предположению, мы приняли, что содержание фосфора  $\log \epsilon(P)$  в сравнительно глубоких слоях HR 1512 постоянно и совпадает с солнечным содержанием  $\log \epsilon_{\odot}(P) = 5.46$  [13]. Мы также предположили, что при приближении к поверхности имеется переходная зона, где величина  $\log \epsilon(P)$  повышается до некоторого значения, и в более высоких слоях это измененное значение сохраняется постоянным. Отметим, что подобная модель для распределения  $\log \epsilon$  в атмосферах CP-звезд использовалась и другими авторами при исследовании стратификации некоторых элементов (см., например, [4, 10]).

При подборе эмпирического распределения  $\log \epsilon(P)$  в атмосфере звезды HR 1512 мы основывались на сравнении теоретических эквивалентных ширины  $W_{th}$  линий PII с наблюдаемыми величинами  $W_{obs}$ . Мы стремились

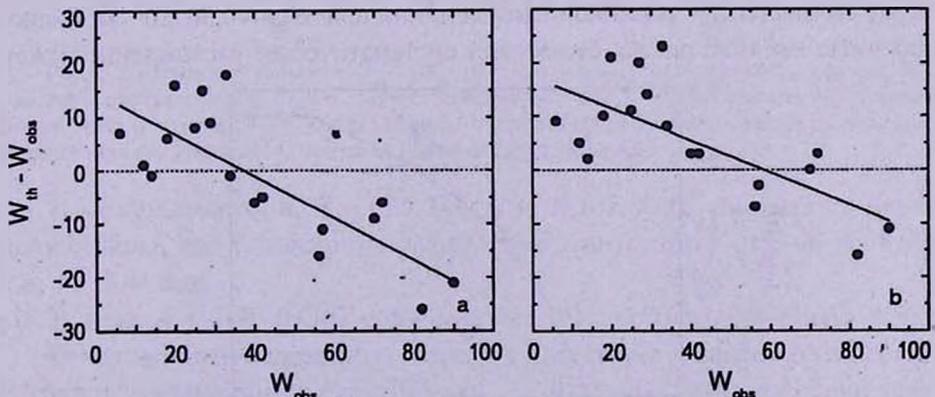


Рис.4. Зависимость разности  $W_{th} - W_{obs}$  от наблюдаемой эквивалентной ширины  $W_{obs}$  для следующих случаев: а) содержание фосфора в атмосфере постоянно и равно  $\log \epsilon(P) = 7.08$ ; б) распределение  $\log \epsilon(P)$  соответствует прямой, показанной на рис.3. Сплошные прямые линии проведены методом наименьших квадратов.

выполнить два условия, а именно: разность  $W_{th} - W_{obs}$  не должна показывать тренда с величиной  $W_{obs}$  и, кроме того, эта разность не должна систематически отличаться от нуля. Другими словами, мы добивались наилучшего согласия между расчетами и наблюдениями.

Прежде всего, мы построили зависимость разности  $W_{th} - W_{obs}$  от наблюдаемой эквивалентной ширины  $W_{obs}$  для случая, когда содержание фосфора в атмосфере постоянно и равно найденному выше среднему значению  $\log_e(P) = 7.08$ . Рис.4а показывает, что в этом далеком от реальности случае, как и следовало ожидать, имеет место сильное систематическое расхождение между теорией и наблюдениями. Значения  $W_{th}$  для слабых линий оказались завышенными, а для более сильных линий - заниженными. Это еще раз подтверждает, что содержание фосфора в атмосфере HR 1512 не может быть постоянным.

Следующим шагом было построение зависимости  $W_{th} - W_{obs}$  от  $W_{obs}$  для случая, когда содержание  $\log_e(P)$  меняется с высотой  $H$  в соответствии с прямой линией, показанной на рис.3. Эта прямая охватывает интервал высот  $H$  от  $0.10 \cdot 10^9$  см до  $0.97 \cdot 10^9$  см или в шкале оптических глубин  $\tau_{5000}$  от 0.8 до 0.07 (связь между  $H$  и  $\tau_{5000}$  задается моделью атмосферы HR 1512). Мы продолжили прямую в глубокие слои атмосферы до достижения солнечного содержания  $\log_e(P) = 5.46$ ; это произошло при значении  $H_{low} = -1.08 \cdot 10^9$  см или на оптической глубине  $\tau_{5000} \approx 7$ . Глубже величина  $\log_e(P)$  считалась постоянной и равной 5.46. Отметим, что столь глубокие слои практически не оказывают никакого влияния на формирование линий. Верхнюю границу интервала высот  $H_{up}$  мы варьировали, принимая  $\log_e(P) = \text{const}$  при  $H > H_{up}$  (согласно предположению, принятому выше).

На рис.4б показана зависимость  $W_{th} - W_{obs}$  от  $W_{obs}$ , когда распределение  $\log_e(P)$  соответствует указанной прямой линии при  $H_{up} = 0.90 \cdot 10^9$  см. Видно, что здесь, как и на рис.4а, существует систематическое расхождение между

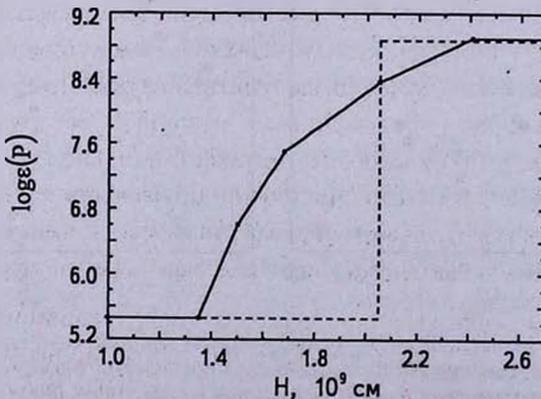


Рис.5. Два возможных распределения  $\log_e(P)$  в атмосфере HR 1512.

расчетами и наблюдениями, хотя тренд здесь менее крутой (наклон прямой линии, проведенной методом наименьших квадратов, меньше на 30%). Следует отметить, что повышение или понижение  $H_{sp}$  не устраняет тренда на рис.4b, а лишь сдвигает всю зависимость по вертикальной оси соответственно вверх или вниз. Мы уже отмечали, что понятие средней глубины образования  $\tau_w$  (или соответствующей высоты  $H_p$ ) достаточно условно. Кроме того, при вычислении  $\tau_w$  не был учтен эффект стратификации. Вероятно, именно по этим причинам использование зависимости  $\log_e(P)$  от  $H_p$ , показанной на рис.3, не приводит к радикальному улучшению соответствия между теоретическими и наблюдаемыми эквивалентными ширинами.

Чтобы найти искомое распределение величины  $\log_e(P)$  по высоте  $H$ , мы просчитали более 40 вариантов, все время сдвигая это распределение в сторону бóльших высот. В результате была получена зависимость  $\log_e(P)$  от  $H$ , представленная на рис.5 ломаной линией. Она имеет следующие характеристики:

1) при  $H < 1.35 \cdot 10^9$  см величина  $\log_e(P)$  постоянна и равна 5.46 - это нормальное (солнечное) содержание;

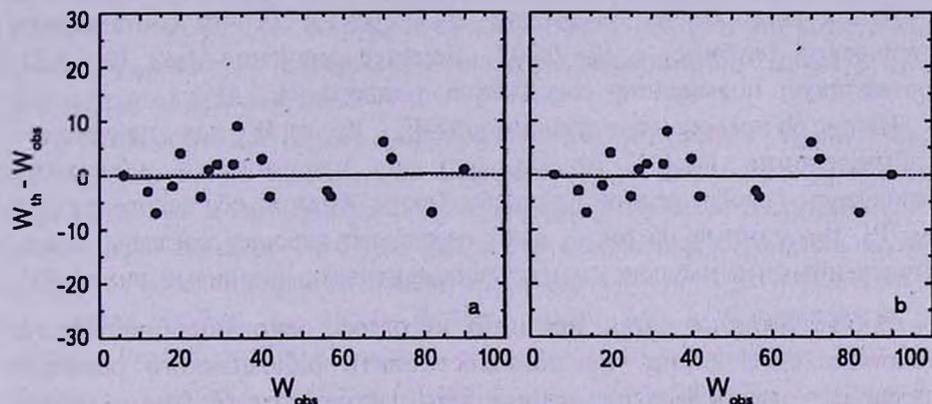


Рис.6. Зависимость разности  $W_{th} - W_{obs}$  от наблюдаемой эквивалентной ширины  $W_{obs}$  для двух распределений  $\log_e(P)$ , представленных на рис.5: а) для сплошной ломаной линии; б) для ступенчатого распределения, показанного штриховой линией. Сплошные прямые линии проведены методом наименьших квадратов.

2) между высотами  $H = 1.35 \cdot 10^9$  см и  $H = 2.41 \cdot 10^9$  см имеется переходная зона, где содержание  $\log_e(P)$  круто возрастает от 5.46 до 8.90, т.е. на 3.44 dex;

3) при  $H > 2.41 \cdot 10^9$  см величина  $\log_e(P)$  постоянна и равна 8.90.

Отметим, что переходной зоне соответствует область оптических глубин в непрерывном спектре  $\tau_{5000}$  от 0.02 до 0.0007, т.е. речь идет о достаточно высоких атмосферных слоях.

На рис.6а показана соответствующая зависимость  $W_{th} - W_{obs}$  от  $W_{obs}$ .

Видим, что прямая линия, проведенная методом наименьших квадратов, практически не отличается от нулевой (штриховой) линии. Таким образом, выполнены оба условия, поставленные выше, а именно: разность  $W_{\text{н}} - W_{\text{об}}$  не показывает тренда с величиной  $W_{\text{об}}$  и, кроме того, эта разность в среднем равна нулю.

Саванов и др. [4] при исследовании вертикального распределения хрома в атмосферах Ам-звезд и магнитных Ар-звезд использовали простейшую модель - ступенчатое распределение  $\log \epsilon(\text{Cr})$ . Предполагалось, что величина  $\log \epsilon(\text{Cr})$  меняется на какой-то глубине скачком; ставилась задача определить величину скачка и его положение в атмосфере звезды. Для сравнения мы рассмотрели аналогичное распределение для содержания фосфора  $\log \epsilon(\text{P})$  в случае HR 1512. Был просчитан ряд вариантов, в которых варьировались высота  $H_0$ , где расположен скачок  $\log \epsilon(\text{P})$ , и верхнее значение  $\log \epsilon_{\text{up}}(\text{P})$  содержания фосфора. Оказалось, что параметр  $H_0$  определяет наклон зависимости  $W_{\text{н}} - W_{\text{об}}$  от  $W_{\text{об}}$ , в то время как величина  $\log \epsilon_{\text{up}}(\text{P})$  регулирует отличие  $W_{\text{н}} - W_{\text{об}}$  от нулевой линии. В результате однозначно было получено ступенчатое распределение содержания фосфора, показанное на рис.5 штриховой линией. Здесь ступенька расположена на высоте  $H_0 = 2.05 \cdot 10^9$  см, что соответствует оптической глубине  $\tau_{5000} = 0.002$ . Верхнее значение  $\log \epsilon_{\text{up}}(\text{P}) = 8.87$  соответствует повышению содержания фосфора на 3.41 dex.

На рис.6b представлена зависимость  $W_{\text{н}} - W_{\text{об}}$  от  $W_{\text{об}}$  для ступенчатого распределения  $\log \epsilon(\text{P})$ . Видим, что она практически идентична зависимости, изображенной на рис.6a. Таким образом, оба распределения  $\log \epsilon(\text{P})$ , показанные на рис.5, дают одинаково хорошее согласие между вычисленными и наблюдаемыми эквивалентными ширинами линий PII.

4. *Обсуждение.* Итак, принятая методика, основанная на анализе эквивалентных ширин, не позволяет найти однозначного решения проблемы - подбора распределения  $\log \epsilon(\text{P})$  по высоте  $H$ . Тем не менее, оба распределения, представленные на рис.5, имеют некоторые общие особенности. Во-первых, быстрое увеличение содержания фосфора  $\log \epsilon(\text{P})$  происходит в одной и той же области высот  $H$ , которой соответствуют оптические глубины  $\tau_{5000} \approx 10^{-2} - 10^{-3}$ . Таким образом, стратификация фосфора имеет место в достаточно высоких слоях атмосферы HR 1512. Во-вторых, верхняя граница  $\log \epsilon_{\text{up}}(\text{P}) = 8.9$  в обоих случаях практически одна и та же, т.е. в переходной зоне происходит повышение  $\log \epsilon(\text{P})$  на 3.4 dex.

Как уже отмечалось, стратификация химических элементов в звездах типа helium-weak практически не исследована. Эта проблема рассматривалась лишь для менее горячих и менее массивных звезд типов Ар, Ам и HgMn. Более того, фосфор как объект стратификации никогда не изучался.

Тем не менее, интересно было бы сравнить, хотя бы качественно, наши результаты по фосфору для HR 1512 с теми данными, которые были получены по другим элементам для других CP-звезд.

Среди звезд типа helium-weak выделяют три подтипа - PGa, Si и TiSr; значительный избыток фосфора свидетельствует о принадлежности HR 1512 к подтипу PGa. Предполагается, что звезды подтипа PGa являются продолжением в область более высоких температур ртутно-марганцевых звезд (по-видимому, и те и другие не имеют ни заметных магнитных полей, ни пятен химического состава на поверхности). Саванов и Хубриг [5] исследовали стратификацию хрома у HgMn-звезд. Как уже указывалось, они анализировали линии CrII в крыльях сильной бальмеровской линии H $\beta$  и искали зависимость содержания хрома  $\log_e(\text{Cr})$  от расстояния  $\Delta l$  до центра H $\beta$ . Согласно их данным, наблюдаемое повышение  $\log_e(\text{Cr})$  достигает 0.7 dex. Если оценивать наблюдаемое повышение содержания фосфора  $\log_e(\text{P})$  у HR 1512 по прямым линиям на рис.1a или 3, оно составляет около 0.8 dex. Следовательно, что касается наблюдаемого увеличения содержания P у HR 1512 и содержания Cr у HgMn-звезд, они вполне сопоставимы. Отметим, что избыток хрома у HgMn-звезд в [5] варьируется от 0 до 0.8 dex, в то время как у HR 1512 он составляет 0.5 dex [6]. Было бы интересно поискать стратификацию хрома у HR 1512 методом, описанным в [5].

К сожалению, в [5] не подбиралось распределение  $\log_e(\text{Cr})$  для HgMn-звезд. Такой подбор был выполнен в [4] для более холодных звезд типов Am и Ap, причем было принято ступенчатое распределение хрома. Было найдено, что для Am-звезд положение ступеньки соответствует росселандовой оптической глубине  $\tau_R \approx 10^{-2} - 10^{-3}$  (отметим, что шкала глубин  $\tau_R$  очень близка шкале  $\tau_{5000}$ ). В частности, у звезды  $\sigma$  Peg ( $T_{\text{эф}} = 9800$  K) скачок в содержании хрома происходит на глубине  $\tau_R \approx 0.002$ , которая фактически совпадает со значением  $\tau_{5000} = 0.002$ , найденным выше для ступенчатого распределения фосфора в случае HR 1512.

Интересные результаты относительно стратификации ряда химических элементов получены в [10] для магнитной Ap-звезды  $\gamma$  Equ ( $T_{\text{эф}} = 7700$  K). Отметим, что у магнитных Ap-звезд могут наблюдаться распределения  $\log_e$ , обратные тем, которые получаются для немагнитных CP-звезд типов Am и HgMn (например, содержание хрома может с высотой понижаться, см. [3]). В [10] показано, что в атмосфере  $\gamma$  Equ на оптических глубинах  $-1.5 < \log \tau_{5000} < -0.5$  происходит резкое падение содержаний Fe, Cr, Na, Si, Ca и Ba. Уменьшение  $\log_e$  различно для разных элементов - от 1.8 dex для Si до почти 4 dex для Ca. В частности, изменение содержания железа составило 3.5 dex, что по величине

соответствует повышению содержания фосфора на 3.4 dex у HR 1512. Для двух редкоземельных элементов - Pr и Nd - найдено увеличение содержания более чем на 6 dex в высоких слоях атмосферы, соответствующих оптическим глубинам  $\tau_{5000} < 10^{-8}$ .

Мы приходим к выводу, что наши результаты относительно стратификации фосфора в атмосфере HR 1512 не противоречат приведенным данным. У других CP-звезд наблюдаются близкие по величине крутые изменения в содержаниях  $\log \epsilon$  некоторых элементов, причем примерно на тех же оптических глубинах или даже в более высоких слоях атмосферы.

Представляет интерес сравнение полученных результатов с выводами теории. В последние годы Мишо и его соавторы (см., например, [14, 15]) радикально изменили первоначальную модель, в которой разделение химических элементов вследствие диффузии происходило непосредственно в атмосферах CP-звезд. Теперь, согласно их расчетам, химические аномалии (в том числе и избыток фосфора) возникают в гораздо более глубоких слоях под атмосферой. В частности, у Am-звезд это происходит на глубинах с температурами  $T \approx 200000$  K, где находится конвективная зона железа. В результате получается, что химические аномалии не являются чисто поверхностным явлением, как считалось раньше, но охватывают значительную часть звезды (около 0.1 ее радиуса). В случае HgMn-звезд, как показал Ситон [16], аномалии элементов группы железа могут возникать вплоть до глубин с температурой  $T \approx 10^6$  K. Предполагается, что на поверхности CP-звезд наблюдаются как раз те пекулярные содержания  $\log \epsilon$ , которые сформировались в указанных глубоких слоях.

Видим, что в этих моделях пока нет места для стратификации элементов в атмосферах CP-звезд. Между тем, имеющиеся данные, в том числе и наши результаты по фосфору подтверждают, что такая стратификация существует. Это означает, что в таких моделях при переходе к поверхностным слоям, включая и саму атмосферу, содержания  $\log \epsilon$  должны испытывать значительные вариации (на такую возможность, в частности, указывают расчеты [16]). Мы полагаем, что модели, подобные [14-16], необходимо усовершенствовать с учетом эмпирических данных о стратификации элементов в атмосферах CP-звезд.

**5. Заключение.** Подведем некоторые итоги. Мы показали, что ряд эмпирических зависимостей свидетельствует о росте содержания фосфора  $\log \epsilon(\text{P})$  с высотой в атмосфере HR 1512. Сюда относятся: а) корреляция  $\log \epsilon(\text{P})$  с наблюдаемой эквивалентной шириной  $W_{\text{эм}}$  линий PII; б) корреляция  $\log \epsilon(\text{P})$  с длиной волны линий; в) систематическое расхождение в значениях  $\log \epsilon(\text{P})$  между линиями с разными потенциалами возбуждения  $E_p$ , а именно: линиям с меньшими  $E_p$  соответствует в среднем более

высокое содержание  $\log \epsilon(\text{P})$ ; г) четкая зависимость  $\log \epsilon(\text{P})$  от средней высоты образования  $H_f$ . Кроме того, при предположении о постоянстве  $\log \epsilon(\text{P})$  в атмосфере звезды получается систематическое расхождение между вычисленными ширинами  $W_m$  и наблюдаемыми величинами  $W_{\text{obs}}$ .

Мы поставили задачу подобрать такое распределение содержания фосфора  $\log \epsilon(\text{P})$  по высоте  $H$ , при котором отсутствует систематическое различие между  $W_m$  и  $W_{\text{obs}}$ . Методом проб и ошибок нужное распределение было найдено. Однако оказалось, что к такому же хорошему согласию между  $W_m$  и  $W_{\text{obs}}$  приводит и более простое - ступенчатое - распределение  $\log \epsilon(\text{P})$ . Несмотря на неоднозначность решения, оба распределения имеют общие черты, а именно: 1) крутой подъем  $\log \epsilon(\text{P})$  происходит в одной и той же области высот  $H$ , которой соответствуют оптические глубины  $\tau_{5000} \approx 10^{-2} - 10^{-3}$ , т.е. стратификация фосфора имеет место в достаточно высоких слоях атмосферы HR 1512; 2) верхняя граница  $\log \epsilon_{\text{up}}(\text{P}) = 8.9$  в обоих случаях одна и та же, так что в области подъема происходит повышение  $\log \epsilon(\text{P})$  на 3.4 dex.

Проблема стратификации в звездах типа He-weak практически не исследована. Более того, фосфор как объект стратификации никогда не изучался. Поэтому, что касается сравнения с опубликованными данными, мы могли сопоставить наши результаты по фосфору для HR 1512 лишь с тем, что было получено по другим элементам для CP-звезд других типов. Такое сравнение с имеющимися данными для звезд типов HgMn, Am и Ap показало, что у других CP-звезд наблюдаются близкие по величине круглые изменения в содержаниях  $\log \epsilon$  некоторых элементов, причем примерно на тех же оптических глубинах или даже в более высоких слоях атмосферы.

В заключение перечислим, что можно было бы сделать в будущем. Мы предполагаем, что проблему неоднозначности искомого распределения  $\log \epsilon(\text{P})$  в атмосфере HR 1512, возможно, удалось бы решить, если вместо эквивалентных ширин линий PII анализировать их профили. Далее, для повышения надежности такой анализ следовало бы провести при отказе от условия ЛТР (локальное термодинамическое равновесие). К сожалению, не-ЛТР расчеты линий PII в настоящее время затруднены из-за отсутствия необходимых данных для атома фосфора, в частности, данных о сечениях фотоионизации. В связи с проблемой не-ЛТР интересно отметить, что обнаруженная в [6] стратификация гелия была основана на не-ЛТР анализе линий HeI. Таким образом, учет отклонений от ЛТР, вообще говоря, не снимает проблему стратификации.

Возможно, следовало бы также учесть в расчетах линий PII сверхтонкую структуру (hfs) энергетических уровней. Нам не удалось найти в литературе каких-либо hfs-данных для этих линий. Сама по себе эта проблема достаточно сложна, как хорошо видно на примере линий MnII [17].

Поэтому она, как и проблема не-ЛТР, требует отдельного рассмотрения. Следовало бы также пересчитать модель атмосферы HR 1512 с учетом того, что содержание фосфора, а также гелия (см. [6]) существенно повышается с высотой. Предварительно необходимо получить распределение содержания гелия. Интересно было бы проанализировать стратификацию фосфора не только у HR 1512, но также у HgMn-звезд, для которых характерен избыток этого элемента порядка 1-2 dex.

Мы благодарим проф. Н.А.Сахибуллина, за полезные замечания.

НИИ Крымская астрофизическая обсерватория, Украина  
e-mail: lyub@crao.crimea.ua poklad@crao.crimea.ua rtm@crao.crimea.ua

## PHOSPHORUS STRATIFICATION IN THE ATMOSPHERE OF THE CHEMICALLY PECULIAR B-TYPE STAR HR 1512

L.S.LYUBIMKOV, D.B.POKLAD, T.M.RACHKOVSKAYA

It is shown that a number of empirical relations testify of increase of the phosphorus abundance  $\log\epsilon(P)$  with height in the atmosphere of HR 1512. There are the following relations: a) correlation of  $\log\epsilon(P)$  with the observed equivalent width  $W_{obs}$  of PII lines; b) correlation of  $\log\epsilon(P)$  with the wavelength of the lines; c) systematic difference in  $\log\epsilon(P)$  between the lines with different excitation potentials  $E_p$ , namely: the greater abundance  $\log\epsilon(P)$  corresponds on average to the lines with less  $E_p$ ; d) clear dependence of  $\log\epsilon(P)$  on the mean geometrical height of formation  $H_f$ . Moreover, when assuming the  $\log\epsilon(P)$  constancy in the star's atmosphere, one obtains a systematic discrepancy between the computed equivalent widths  $W_{th}$  and the observed values  $W_{obs}$ . By using the trial and error method we picked out just the distribution of the phosphorus abundance  $\log\epsilon(P)$  on the height  $H$ , where there is no systematic discrepancy between  $W_{th}$  and  $W_{obs}$ . However, the same good agreement between  $W_{th}$  and  $W_{obs}$  results from the simpler - stepped - distribution of  $\log\epsilon(P)$ . In spite of the multivalued solution, both distributions have common features, namely: 1) the sharp  $\log\epsilon(P)$  enhancement occurs in the same region of heights  $H$  with corresponding optical depths  $\tau_{5000} \approx 10^{-2} - 10^{-3}$ , i.e. the phosphorus stratification takes place in rather high layers of the star's atmosphere; 2) the upper limit  $\log\epsilon_{up}(P) = 8.9$  is the same in both cases, so the  $\log\epsilon(P)$  enhancement in this region is 3.4dex. Comparison with available data for

HgMn-, Am- and Ap-type stars showed that for other CP-stars the similar sharp changes in abundances  $\log \epsilon$  of some elements are observed and on the same optical depths or in even higher layers of the atmosphere.

Key words: *stars:chemically peculiar:abundances:stratification*

## ЛИТЕРАТУРА

1. Л.С.Любимков, Химический состав звезд: метод и результаты анализа, Одесса, Астропринт, 1995.
2. G.Michaud, *Astrophys. J.*, **160**, 641, 1970.
3. И.С.Саванов, О.П.Кочухов, В.В.Цымбал, *Астрофизика*, **44**, 79, 2001.
4. И.С.Саванов, О.П.Кочухов, В.В.Цымбал, *Астрофизика*, **44**, 253, 2001.
5. I.Savanov, S.Hubrig, *Astron. Astrophys.*, **410**, 299, 2003.
6. Т.М.Рачковская, Л.С.Любимков, С.И.Ростопчин, *Астрон. ж.*, **83**, 146, 2006.
7. L.S.Lyubimkov, S.I.Rostopchin, D.L.Lambert, *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, **351**, 745, 2004.
8. F.Купка, N.Е.Рискун, Т.А.Рябчикова et al., *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.*, **138**, 119, 1999.
9. W.L.Wiese, J.R.Fuhr, NIST Atomic Spectra Database, Lines Data, 1999; <http://www.nist.gov/srd/atomic.htm>.
10. Т.Рябчикова, N.Рискун, О.Кочухов et al., *Astron. Astrophys.*, **384**, 545, 2002.
11. Л.С.Любимков, *Изв. Крымск. астрофиз. обсерв.*, **62**, 44, 1980.
12. R.Kurucz, ATLAS9 Stellar Atmosphere Programs and 2 km s<sup>-1</sup> Grid. CD-ROM No.13, Cambridge, Mass., Smithsonian Astrophys. Obs., 1993.
13. K.Lodders, *Astrophys. J.*, **591**, 1220, 2003.
14. G.Michaud, In "The A-Star Puzzle" (IAU Simp. 224). Eds. J.Zverko, J.Ziznovsky, S.J.Adelman, W.W.Weiss (Cambridge, Cambridge University Press), 2004, p.173.
15. J.Richer. G.Michaud, S.Turcotte, *Astrophys. J.*, **529**, 338, 2000.
16. M.J.Seaton, *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, **307**, 1008, 1999.
17. C.M.Jomaron, M.M.Dworetzky, C.S.Allen, *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, **303**, 555, 1999.