

УДК 524.31.01-335:52-14(084)

## СПЕКТРАЛЬНЫЙ АТЛАС СВЕРХГИГАНТОВ O9.5–A1

© 2007 Е. Л. Ченцов, А. Н. Саркисян

*Специальная астрофизическая обсерватория, Нижний Архыз, 369167 Россия*

Поступила в редакцию 25 сентября 2006; принята в печать 3 октября 2006

В графической и табличной форме сопоставлены спектры высокого разрешения 9 верхгигантов и 3 звезд сравнения, полученные с помощью ПЗС-эшелле спектрометров в фокусах кудэ 1-м телескопа САО РАН и 2-м телескопа обсерватории Терскол ( $R = 40000$  и  $R = 45000$  соответственно). В интервале  $3600\text{--}7800 \text{ \AA}$  отождествлено от 200 ( $\alpha$  Cam, O9.5 Ia) до 1000 (HD 12953, A1 Ia-0) звездных и межзвездных линий и полос, для большинства из них измерены центральные остаточные интенсивности и гелиоцентрические лучевые скорости. Апробирована спектральная классификация по слабым фотосферным абсорбциям. Это актуально для наиболее ярких сверхгигантов и гипергигантов, у которых области формирования сильных линий, традиционно используемых при классификации, охватывают и основания ветров. Выявлены радиальные градиенты скорости в атмосферах сверхгигантов. Приведены примеры уточнения эффективных длин волн, анализа бленд и выявления ветровых аномалий в профилях линий. Атлас активно используется и как учебное пособие.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Настоящий атлас — добавочный продукт выполнившихся в САО РАН наблюдательных программ, в которых ярчайшие звезды Галактики, сверх- и гипергиганты ранних спектральных классов, были объектами исследования или использовались для изучения межзвездной среды. Спектральные атласы по-прежнему находят широкое применение. Более того, в последнее время спрос на них возрос в связи с резким расширением наблюдательных возможностей. Сегодня атласы особенно востребованы в звездной спектроскопии высокого разрешения, где с их помощью решаются как собственно астрофизические, так и методические задачи. Очевидна их полезность и как учебных пособий.

Атлас — хорошая форма обобщения и архивации наблюдательного материала. Часто рабочий вариант атласа изготавливается по первому полученному спектру некоторого объекта, с тем, чтобы опираться на него при получении, обработке и анализе новых спектров. Но ценность атласа значительно повышается с увеличением количества включенных в него спектров, опираясь на которые удобно отождествлять линии в спектрах звезд близких спектральных классов, а также выявлять в них различные аномалии. Если атлас демонстрирует постепенное изменение спектра с температурой или светимостью, то правильность отождествления контролируется по усилению или ослаблению линий от спектра к спектру и по изменению формы их профилей. Заодно с реальными аномалиями спектров выявляются и те, что связаны с нестабиль-

ностью спектрографа или нарушением режима его эксплуатации (неточность выставления решетки, расфокусировка камеры, загрязнение покровного стекла матрицы ПЗС и т.п.). Измерение лучевых скоростей, обычно практикуемое при изготовлении атласа и нацеленное на отождествление линий и описание кинематики атмосферы звезды, также имеет метрологический выход: попутно уточняются эффективные длины волн измеряемых линий.

Среди атласов нового поколения, использующих ПЗС-спектры, имеются как детальные описания спектров отдельных объектов, так и коллекции спектров, полученных в ограниченном интервале длин волн и с умеренным разрешением. Атлас первого типа изготовлен, например, Альбайраком и др. [1] для Денеба (A2 Ia): спектральный диапазон  $3800\text{--}5200 \text{ \AA}$ , разрешение — до 70000, отношение сигнал-шум — не менее 1000. Второй тип хорошо представлен атласом Леннона и др. [2] — спектры 46 сверхгигантов O9–V9 в диапазоне  $3950\text{--}4950 \text{ \AA}$  со средним разрешением 5000 и отношением сигнал-шум 150. Наш атлас занимает промежуточное положение и тем самым удачно дополняет атласы [1] и [2]. Мы сопоставляем спектры 12-ти звезд O9–A1 от  $3600 \text{ \AA}$  до  $7800 \text{ \AA}$  со средним разрешением 40000. Главных объектов 9, это сверхгиганты, в основном класса светимости Ia. К ним добавлены в качестве звезд сравнения еще один сверхгигант (класса светимости Ib) и два карлика с узкими линиями в спектрах.

Некоторые сведения о них приведены в табл. 1. Это:

- название звезд и их спектральные классы по нашим оценкам (колонка 1),
  - галактические координаты  $l$ ,  $b$  (колонка 2, округлены до целых градусов),
  - видимые визуальные величины (колонка 3, округлены до десятых зв. вел.),
  - даты наблюдений и использованные инструменты (колонка 4).
- переход в шкалу длин волн, т.е. приведение исходных данных  $I(x)$  к виду  $I(\lambda)$ ,
  - проведение континуума и редукцию массивов  $I(\lambda)$  в  $r(\lambda)$ , т.е. переход к остаточным интенсивностям (при построении кривой  $I_{cont}(\lambda)$  в некотором порядке можно опираться на близкие по форме кривые соседних порядков),
  - измерение лучевых скоростей для отдельных линий путем взаимного сдвига по горизонтали прямых и зеркальных изображений их профилей до наилучшего совмещения.

Поскольку сверхгиганты фотометрически и спектрально переменны, важно отметить, что в колонке 3 даны средние значения, а приведенный спектральный класс является текущим на момент наблюдений.

## 2. НАБЛЮДАТЕЛЬНЫЙ МАТЕРИАЛ И ЕГО ОБРАБОТКА

Включенные в атлас спектры отобраны из архивов кудэ-эшелле-спектрометров 1-м телескопа SAO [3] и 2-м телескопа обсерватории Терскол [4]. Приборы почти идентичны по конструкции, они обеспечивают одновременную регистрацию участка спектра от 3400 до 10100 Å с разрешениями 40000 и 45000 соответственно. В период получения использованных нами спектров светоприемником служила одна и та же ПЗС-матрица 1242 × 1152 элемента размером 22.5 × 22.5 мкм каждый. Отношение сигнал-шум для отобранных спектров достигает 100, что в сочетании с указанным разрешением позволяет с удовлетворительной точностью измерять интенсивности и положения линий, описывать форму профилей и выявлять ее аномалии.

Первичная редукция ПЗС-изображений, проведенная в контексте ECHELLE системы MIDAS, включает:

- удаление следов космических частиц усреднением двух одинаковых спектров, полученных один за другим,
- вычитание фона,
- экстракцию из двумерных изображений одномерных фрагментов, соответствующих отдельным порядкам,
- построение дисперсионных кривых по спектрам лампы с полым катодом (Th+Ar) или звезды-стандарта лучевой скорости.

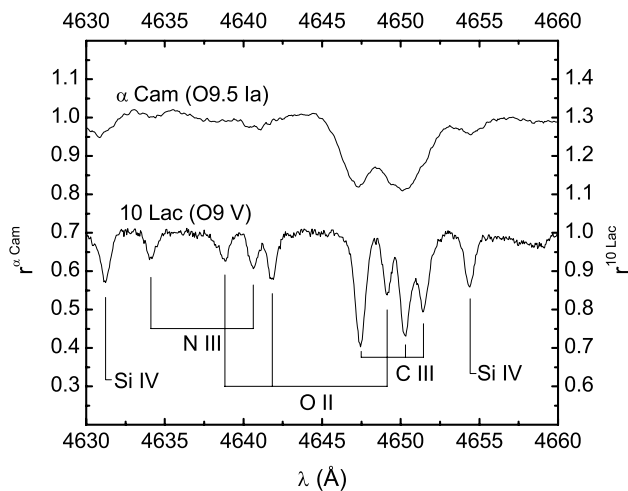
Окончательная обработка выполнена с помощью специализированной программы DECH [5], которая, в частности, обеспечивает:

Лабораторные длины волн, использованные непосредственно или как основа для получения их эффективных значений, взяты для звездных и межзвездных линий в основном из таблиц Стриганова и Одинцовой [6] и Йоханссона [7], для межзвездных полос, DIB, — из атласа Галазутдинова и др. [8], для теллурических линий — из таблиц солнечного спектра Пирса и Брекинриджа [9]. Эффективные длины волн были опробованы и уточнены при создании нескольких атласов звездных спектров высокого разрешения [10–12, др.], их список пополнен и в данной работе.

Небольшие инструментальные сдвиги спектров объектов относительно спектров сравнения выявлены и скорректированы с помощью теллурических абсорбций O<sub>2</sub> и H<sub>2</sub>O. Остаточные систематические погрешности лучевых скоростей оценены по межзвездным линиям NaI и KI путем сравнения наших данных с надежными высокоточными данными Мюнча [13], Хоббса [14, 15], Чаффи и Уайта [16]. Они не превышают 1–1.5 км/с.

## 3. АТЛАС И СПИСКИ ОТОЖДЕСТВЛЕННЫХ ЛИНИЙ И ПОЛОС

Спектры основных 9-ти объектов представлены двояко: графически как зависимости остаточной интенсивности от длины волны (собственно атлас, приводится в Приложении) и в виде таблиц, в которые включены также спектры 3-х звезд сравнения (табл.3–5, доступны по адресу [www.sao.ru/hq/ssl/sg/Supergiants.atlas\\_html](http://www.sao.ru/hq/ssl/sg/Supergiants.atlas_html)). Для каждого из объектов массивы  $r(\lambda)$  отдельных эшелльных порядков, перекрывающиеся по  $\lambda$ , были соединены в единый массив, затем он был разбит на одинаковые фрагменты по 140 Å. Перекрывание порядков уменьшается с длиной волны и, начиная с  $\lambda \sim 6600$  Å, уже появляются разрывы кривых  $r(\lambda)$ . В ближней инфракрасной области многие детали спектров потеряны в этих разрывах или заглушены многочисленными теллурическими



**Рис. 1.** Участок спектра  $\alpha$  Cam O9.5 Ia в сравнении с тем же участком спектра 10 Lac O9 V. Положения всех линий 10 Lac и слабых фотосферных абсорбций  $\alpha$  Cam соответствуют их лабораторным длинам волн.

линиями. Поэтому графическое представление спектров мы ограничили непрерывным интервалом 3680–6820 Å и двумя участками, 7380–7520 Å и 7680–7820 Å, содержащими важные линии. В связи с тем, что нестационарность атмосфер сверхгигантов проявляется в заметных дифференциальных сдвигах линий, все графики  $r(\lambda)$  смещены по горизонтали так, чтобы положения слабых фотосферных абсорбций пришли в соответствие с их лабораторными длинами волн. При этом, конечно, рассогласовались положения межзвездных и теллурических абсорбций.

Звезды сравнения с их стационарными атмосферами и узкими линиями в спектрах выполняют несколько функций: помогают разобраться в структуре бленд, пополнить списки эффективных длин волн, увидеть ветровые аномалии профилей. Эти функции и их взаимосвязь иллюстрируются рис. 1–3. На них для основных и вспомогательных объектов близких спектральных классов сопоставлены одни и те же небольшие участки спектров.

Рис. 1 показывает, как тесные группы линий, разделенных в спектре звезды главной последовательности 10 Lac O9 V, сливаются в широкие депрессии в спектре сверхгиганта  $\alpha$  Cam. Из помеченных на рисунке линий у  $\alpha$  Cam отчетливо видны только абсорбции C III, N III и Si IV, во всяком случае только по ним удастся измерить лучевые скорости, в то время как у 10 Lac скорости уверенно измеряются также и по линиям O II. Хотя звезды различаются по абсолютной величине всего на  $2^m$ , эффект светимости заметен. Прежде всего он сказывается на линиях C III, достигающих

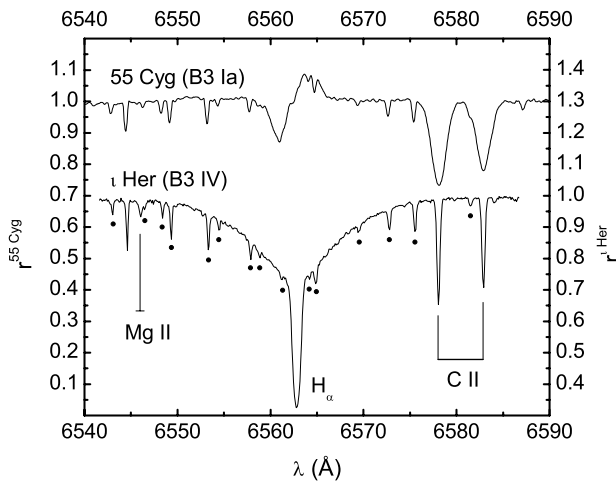
**Таблица 1.** Данные об объектах и их наблюдениях

Звезда	$l$	$V$	Дата
$Sp$	$b$		Телескоп <sup>1</sup>
Основные объекты			
$\alpha$ Cam	144	4.3	23.11.96
O9.5 Ia	14		1
$\epsilon$ Ori	205	1.7	03.12.98
B0.0 Ia	–17		1
HD 13854	134	6.5	06.10.99
B1.2 Ia	–4		2
9 Cep	102	4.7	14.09.97
B2.3 Ib	7		1
55 Cyg	86	4.8	15.05.97
B3.0 Ia	2		1
67 Oph	30	3.6	29.09.99
B4.2 Ib	13		2
$\beta$ Ori	209	0.1	06.10.99
B8.0 Ia	–25		2
1H Cam	142	4.5	15.11.97
A0.0 Ia	2		2
HD 12953	133	5.7	27.09.99
A1.0 Ia-0	–3		2
Звезды сравнения			
10 Lac	97	4.9	01.09.99
O9 V	–17		2
$\iota$ Her	72	3.8	10.06.97
B3 IV	31		1
$\eta$ Leo	220	3.5	08.03.98
A0 Ib	51		2

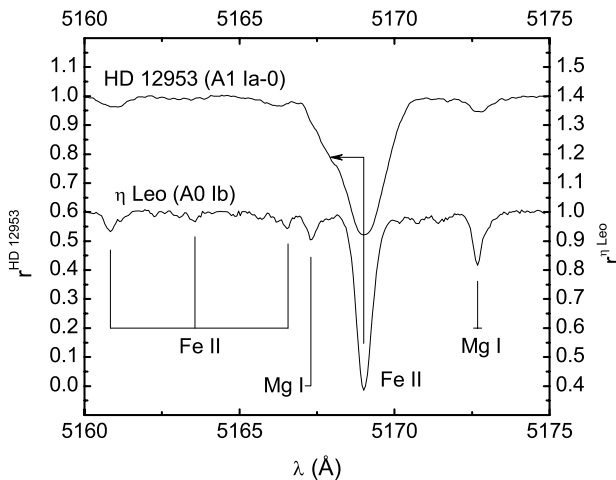
<sup>1</sup>1 — 1-м телескоп САО РАН,

2 — 2-м телескоп обсерватории Терскол

в подклассе O9 максимальной интенсивности. О высокой светимости  $\alpha$  Cam и о наличии у звезды расширяющейся оболочки (ветра) свидетельствуют также широкие эмиссии в линиях N III 4634, 4641. Регистрация таких слабых и протяженных



**Рис. 2.** То же, что на рис. 1, для 55 Cyg B3 Ia и  $\iota$  Her B3 IV. Точками помечены линии H<sub>2</sub>O земной атмосферы.



**Рис. 3.** То же, что на рис. 1–2, для HD 12953 A1 Ia-0 и  $\eta$  Leo A0 Ib. В спектре HD 12953 стрелкой указана ветровая депрессия на синем крыле линии FeII(42) 5169 Å.

деталей — сложная задача для эшелюной спектроскопии.

В паре 55 Cyg B3 Ia —  $\iota$  Her B3 IV разность абсолютных величин больше,  $\Delta M_V \sim 5^m$ , и рис. 2 демонстрирует эффект светимости в прямом и обратном вариантах. В спектре карлика  $\iota$  Her красное крыло фотосферной абсорбции H $\alpha$  дотягивается до линий CII 6578, 6583, которые много слабее ее и почти так же узки, как теллурические линии. В спектре же сверхгиганта 55 Cyg абсорбции CII гораздо интенсивнее, чем у  $\iota$  Her, и каждая из них сильнее синесмещенной абсорбционной составляющей ветрового профиля H $\alpha$ .

Рис. 3 показывает окрестности сильной линии FeII(42) 5169 Å в спектрах HD 12953 A1 Ia-0 и  $\eta$  Leo A0 Ib. У первого объекта абсорбция шире, чем у второго. Нижняя половина профиля симметрична, в ней уширяющее и усиливающее действие турбуленции проявляется в чистом виде. Однако в верхней части профиля симметрия исчезает: виден резкий излом синего крыла, которое оказывается протяженнее красного. Может ли это быть следствием слияния с соседней абсорбцией MgI 5167? Сравнение с контрольным спектром (даже не карлика, а слабого сверхгиганта) убеждает, что основная причина асимметрии — не блендирование, а ветровая депрессия на синем крыле линии, которая смещена относительно ядра на  $-(70 \div 90)$  км/с. Подтверждением этого служит тот факт, что такую же необычную форму имеют профили двух других линий 42-го мультиплета FeII, 4924 и 5018.

Для удобства сопоставления с графиками  $r(\lambda)$  атласа в таблицах вместо эквивалентных ширин приводятся центральные остаточные интенсивности. Вместе с результатами отождествления спектральных деталей звездной и межзвездной природы (теллурические линии исключены), их длинами волн и гелиоцентрическими лучевыми скоростями они собраны в табл. 3, 4 и 5, соответствующих интервалам спектральных классов O9–B1, B2–B5 и B8–A1. Каждая из таблиц содержит данные для одной звезды сравнения и трех сверхгигантов. Строки с информацией об изолированных деталях, т. е. отдельных линиях или блендах, разделены пробелами. Бленды объединяют линии, профили которых перекрываются в спектре хотя бы одного объекта данной группы.

При отождествлении некоторой линии она рассматривается не изолированно, а как возможный член ансамбля для данного элемента в данной стадии ионизации. Критерии ее отнесения к ансамблю:

- длина волны,
- относительная интенсивность,
- лучевая скорость, соответствующая не только длине волны, но и интенсивности линии (как показано в разд. 5, для сверхгигантов характерно существование зависимостей  $V_r(r)$ ),
- форма профиля (тем более существенная, чем выше светимость звезды).

Кроме того, как отмечено во Введении, мы могли проверить правильность отождествления, выйдя за пределы спектра данного объекта и сравнив интенсивность линии в нем и в спектрах соседних объектов атласа. Сопоставим два его фрагмента в

**Таблица 2.** Гелиоцентрические лучевые скорости и дифференциальные сдвиги абсорбции  $H_{\alpha}$ 

Звезда	Sp	$V_r$	$\Delta V_r$
		( $r \rightarrow 1$ )	( $H_{\alpha}$ )
Основные объекты			
$\alpha$ Cam	O9.5 Ia	17	-143
$\epsilon$ Ori	B0.0 Ia	27	
HD 13854	B1.2 Ia	-34	-132
9 Cep	B2.3 Ib	-15	-19
55 Cyg	B3.0 Ia	-10	-88
67 Oph	B4.2 Ib	-4	0
$\beta$ Ori	B8.0 Ia	17	-43
1H Cam	A0.0 Ia	-8	-13
HD 12953	A1.0 Ia-0	-27	-80
Звезды сравнения			
10 Lac	O9 V	-11	0
$\iota$ Her	B3 IV	-30	-1
$\eta$ Leo	A0 Ib	2	-2

интервалах  $\lambda\lambda$  4400–4500 Å и 6500–6600 Å. В первый из них попадает пара сильных линий HeI 4472 и MgII 4481, удобных и традиционно используемых для оценки спектрального класса, т.к. они располагаются по соседству, а их интенсивности изменяются с температурой в противоположных направлениях. Но монотонное изменение интенсивности от спектра к спектру уверенно прослеживается и у гораздо более слабых линий данного фрагмента. Так, абсорбция OII 4415 при переходе от верхней кривой к нижним сначала усиливается, а потом ослабевает, с соседней линией FeII 4420 происходит то же самое, но с отставанием на два подкласса. Во втором фрагменте такую же эволюцию проходит дублет CII 6578, 6583. Но две спектральных детали по обеим сторонам от него ведут себя совершенно иначе. Профиль  $H_{\alpha}$  при переходе от спектра к спектру изменяет форму, но не постепенно, а скачками (один из них — абсорбция у 67 Oph между P Cyg-профилями у 55 Cyg и  $\beta$  Ori). Межзвездная полоса 6614 Å сохраняет форму профиля, но ее глубина не связана со спектральным классом (у  $\epsilon$  Ori и  $\beta$  Ori она вообще отсутствует). Обратившись к табл. 1, мы найдем в первом случае корреляцию со светимостью звезды, а во втором — с ее галактической широтой и удаленностью.

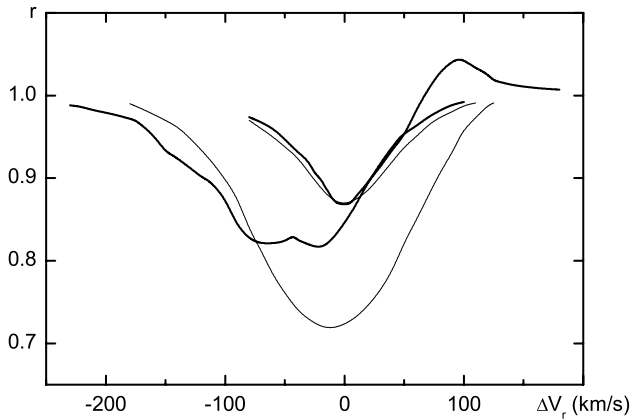
В связи с увеличением рабочего спектрального диапазона, разрешения и отношения сигнал-шум остаются актуальными отождествление все новых линий (в основном слабых, для которых вероятность блендирования повышена) и определение их эффективных длин волн. Эти процедуры, очевидно, взаимосвязаны.

Приведем примеры определения эффективных длин волн для двух крайних вариантов бленд. Простейший случай — тесные мультиплеты одного элемента, для них искомые длины волн не зависят от спектрального класса сверхгиганта. Как видно из табл. 3–5, для каждого из триплетов HeI использовано по два значения  $\lambda$ , оба взяты из работы Снежко и Ченцова [17]. Меньшее значение, близкое к длине волны главного компонента, использовано для карликов 10 Lac и  $\iota$  Her, в спектрах которых асимметричные профили триплетов хорошо прорисованы. Большее значение использовано для всех сверхгигантов атласа.

В тех случаях, когда бленду образуют линии разных элементов, приходится учитывать эволюцию эффективной длины волны со спектральным классом. Для абсорбции вблизи 5002 Å, включающей тесный дублет NII 5001.14, 5001.48 и линию FeII 5001.92, эволюция происходит особенно резко, скачкообразно. Бленду можно было бы просто отбраковать в выделенном интервале подклассов, что, однако, нежелательно, т.к. ее составляющие неравноценны. В то время как спектр NII обилием одиночными абсорбциями, линия 5001.92 Å — одна из немногих сильных представительниц важной подгруппы линий FeII высокого возбуждения [7]. Дублет NII постепенно ослабевает, но остается доминирующим вплоть до подкласса B7. В спектре  $\iota$  Her он разрешен настолько, что скорости надежно измеряются по обоим компонентам, для сверхгигантов B2–B5, как и в случае триплетов HeI, использована одна и та же длина волны, 5001.34 Å. С подкласса B7 вклад линии FeII становится заметным — непосредственно, по асимметрии профиля, и косвенно, по увеличению эффективной длины волны: для HD 183143 B7.7 Ia-0 до 5001.50 Å, для  $\beta$  Ori B8 Ia до 5001.58 Å, а для HD 21389 A0 Ia и HD 12953 A1 Ia-0 уже можно использовать длину волны линии FeII.

#### 4. ИНТЕНСИВНОСТИ ЛИНИЙ И СПЕКТРАЛЬНАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ

Чтобы проиллюстрировать использование атласа при решении некоторых задач количественной спектральной классификации, мы измерили для ряда линий помимо центральных остаточных интенсивностей также и эквивалентные ширины. Речь идет, с одной стороны, о новых возможностях

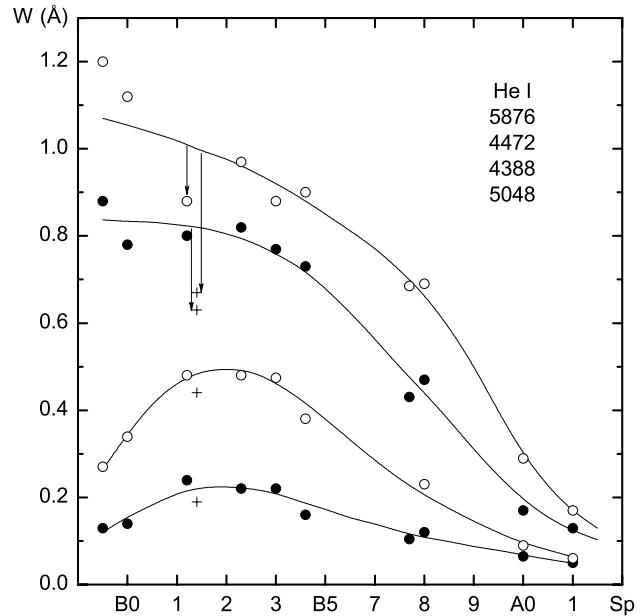


**Рис. 4.** Профили двух линий гелия, слабой He I 5048 и сильной He I 5876, в спектрах HD 13854 B1.2 Ia (тонкие линии) и HD 190603 B1.4 Ia-0 (жирные линии).

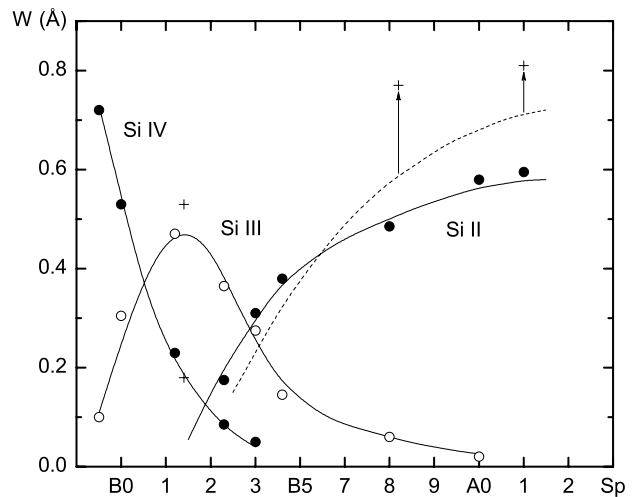
классификации, открывшихся с появлением доступа к длинноволновой области спектра и к слабым линиям, а с другой — о специфике ее применения к звездам наивысшей светимости. В связи с этим в данном разделе рассмотрено несколько дополнительных объектов, звезд-гипергигантов. Их спектры получены с помощью тех же спектрометров и обработаны по той же методике, что и спектры основных объектов, а спектральные классы немного скорректированы.

Традиционная спектральная классификация разрабатывалась для массового применения и потому ограничена синей частью спектра, к которой наиболее чувствительны фотопластинки, и сильными спектральными деталями, различимыми даже при низком разрешении. Любопытно отметить, что первое ограничение удачно компенсирует второе, т.к. в синей области спектра даже сильные абсорбции формируются достаточно глубоко в атмосферах звезд. Переходя в красную и далее в инфракрасную области, мы получаем возможность зондирования все более высоких слоев атмосфер и даже оснований ветров звезд высокой светимости. Однако остается необходимость и в информации об их фотосферах. Для ее получения приходится использовать в качестве классификационных критериев по возможности слабые линии.

На рис. 4 для сверхгиганта из атласа, HD 13854 B1.2 Ia, и дополнительно привлеченного гипергиганта близкого спектрального класса HD 190603 B1.4 Ia-0 сравниваются профили двух линий He I. Нуль-пунктом горизонтальной оси графика служат лучевые скорости, найденные по слабым фотосферным абсорбциям, близкие к скоростям центров масс звезд. Одна из таких слабых абсорбций — линия He I 5048, ее профили в спектрах обеих звезд мало отличаются друг от друга. Другая — He I 5876 — напротив, самая сильная

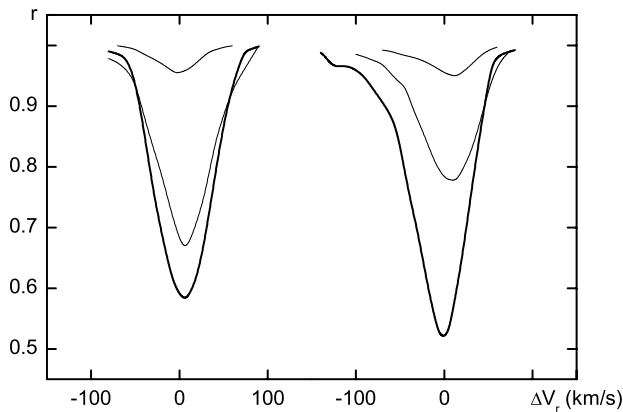


**Рис. 5.** Зависимости от спектрального класса эквивалентных ширин линий нейтрального гелия разной интенсивности. К объектам атласа добавлен гипергигант HD 183143 B7.7. Крестики — гипергигант HD 190603 B1.4.



**Рис. 6.** То же, что на рис. 5, для трех стадий ионизации кремния: Si IV 4089, Si III 4553, Si II 4128+4131 (сплошная линия) и Si II 6347 (прерывистая линия). Крестики — гипергиганты HD 190603 B1.4, HD 168607 B8.2 и HD 12953 A1.0.

в видимой области спектра. У сверхгиганта эта линия — фотосферная абсорбция с небольшими ветровыми аномалиями: заметны синий сдвиг и асимметрия профиля (синее крыло чуть длиннее красного). У гипергиганта она сформирована (по крайней мере, частично) в основании ветра, о чем говорит ее P Cyg-профиль с несколькими дискрет-



**Рис. 7.** Изменения со временем профилей слабой и сильных абсорбций в спектре гипергиганта HD 168607. Сверху вниз: FeII 5260, HeI 5876 (тонкие линии) и SiII 6347 (жирные линии).

ными углублениями в абсорбционной составляющей. Синее крыло профиля HeI 5876 у HD 190603 глубже, но эквивалентная ширина линии в целом намного меньше, чем у HD 13854.

На рис. 5, 6 и 8 гипергиганты показаны крестиками, а эффекты светимости (смещения крестиков по вертикали) отмечены стрелками. Рис. 5 показывает изменения эквивалентных ширин со спектральным классом  $W(Sp)$ , для 4-х линий HeI разной интенсивности. Каждый значок соответствует одной звезде (к 9-ти сверхгигантам атласа добавлен гипергигант HD 183143 B7.7 Ia-0 [18]). Кривые на данном рисунке (как и на рис. 6 и 8) получены независимо по данным из работ Леннона и др. [19], Диделона [20], Бартая и др. [21] с учетом небольших (до 10 %) различий систем  $W$ . Отклонения крестиков (показывающих занижение эквивалентных ширин по сравнению с их значениями для сверхгиганта соответствующего спектрального класса) особенно велики для двух верхних кривых, относящихся к самым сильным линиям, для слабых линий они соизмеримы с общим разбросом значков. Спектральный класс HD 190603 при переходе для его определения от слабых линий к сильным оказывается все более поздним. Его оценка по HeI 4388, 5047 дает B1.0, по линиям SiIV (рис. 6), SiII, OII, FeIII (рис. 8) — B1.3, а по HeI 4472 и 5876 — B5 и B8 соответственно. Та же тенденция видна для гипергигантов более поздних спектральных классов HD 168607 B8.2 Ia-0 и HD 12953 A1 Ia-0.

На рис. 6 зависимости  $W(Sp)$  приведены для трех стадий ионизации кремния, причем в случае SiII — для синей и красной частей спектра (дублет 4128, 4131 и линия 6347 соответственно). В спектрах гипергигантов HD 168607 и HD 12953 последняя линия аномально сильна, но ее усиление, как и ослабление абсорбций HeI 4472 и 5876,

— следствие того, что она формируется не только в фотосфере, но и в более холодной и расширяющейся псевдофотосфере [22]. Оптическая толщина псевдофотосферы в линиях невелика и переменна. Это поясняет рис. 7, на котором сравниваются профили абсорбций SiII 6347 и HeI 5876 для двух моментов наблюдений HD 168607. В первый из них обе линии лишь слегка асимметричны и по интенсивности близки друг к другу. Во второй момент линия SiII намного сильнее линии HeI, профили их перестроились: синие крылья вытянуты, а красные, напротив, укорочены. Это указывает на понижение температуры псевдофотосферы, ее уплотнение и увеличение градиента скорости в ней от первого момента ко второму. В отличие от сильных линий и профиль и интенсивность приводимой на рисунке слабой абсорбции FeII 5260 остались неизменными. Спектральный класс HD 168607 по этой и другим фотосферным линиям для обоих моментов примерно один и тот же — B8.2. Его оценки по указанным выше линиям HeI и SiII дают B9.2 для первого момента и A0.1 для второго.

Сделаем в связи с рис. 7 еще два замечания. Во-первых, обращает на себя внимание высокая информативность профилей достаточно сильных абсорбций. Сопоставление даже не эквивалентных ширин, а только их центральных глубин позволяет оценивать температуру в основании ветра, а по крыльям можно судить о градиенте скорости в нем. И конечно появление их специфической асимметрии служит индикатором усиления ветровой активности. Во-вторых, исследуя сильно покрасневшие В-гипергиганты, такие как HD 168607 или Cyg OB2-12 [23], мы вынуждены смещаться в длинноволновую область спектра, а следовательно, в наружные слои их атмосфер. Однако по крайней мере в периоды просветления их ветров (псевдофотосфер) становятся доступными для исследования и их фотосферы — благодаря слабым абсорбциям. Причем опираться можно не только на линии гелия и легких ионов, но и на абсорбции ионизованного железа высокого возбуждения (потенциал нижнего уровня около 10 eV), такие, как FeII 5260.

Рис. 8 (а) показывает усиление трех абсорбций FeII с понижением эффективной температуры сверхгиганта в интервале поздних подклассов В — ранних подклассов А. Нижняя кривая  $W(Sp)$  относится к упомянутой выше линии высокого возбуждения FeII 5260, остальные — к линиям низкого возбуждения (потенциал нижнего уровня меньше 3 eV), из которых FeII(42) 5169 — сильнейшая из линий ионизованного железа в видимой области спектра. Гипергигант HD 168607 представлен только на нижней кривой, т.к. в его спектре абсорбциями остаются лишь линии высокого возбуждения FeII, линии же низкого возбуждения ветровые,

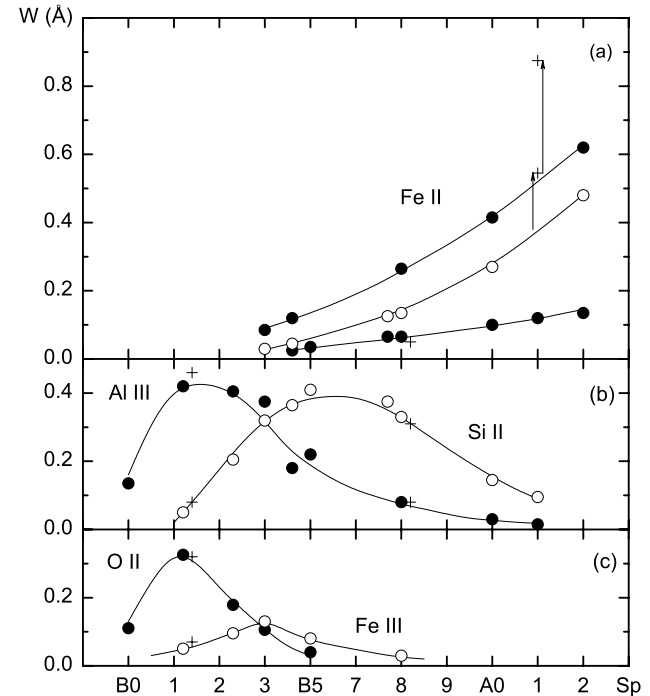
все они, даже самые слабые, имеют профили типа P Cyg с расщепленными абсорбционными компонентами [11]. Более слабый, но качественно тот же эффект наблюдается и у самого холодного из объектов атласа, HD 12953. Как уже отмечалось в разд. 3 и как показывает сопоставление рис. 3 и 8а, наиболее сильные абсорбции FeII низкого возбуждения в его спектре уширены и углублены не только турбуленцией, но и радиальным градиентом скорости (ветровыми добавками).

На рис. 8 (b) и 8 (c) в качестве классификационных критериев предложено еще несколько абсорбций умеренной и малой интенсивности. В отличие от предыдущих рисунков здесь данные для гипергигантов не отклоняются систематически от зависимостей  $W(Sp)$ , построенных для сверхгигантов. То есть светимости не должны сказаться на оценках эффективных температур, сделанных по этим линиям. Разумеется, этими немногими примерами список подходящих линий не исчерпывается. Атлас предоставляет богатый материал для его дальнейшего расширения.

### 5. ЛУЧЕВЫЕ СКОРОСТИ И “КИНЕМАТИЧЕСКИЕ РАЗРЕЗЫ” АТМОСФЕР

В табл. 3–5 приведены гелиоцентрические лучевые скорости, относящиеся к отдельным линиям, полосам или блендам. Их значения округлены до целых км/с. Скорости измерены по абсорбционным ядрам профилей в целом либо (в случаях  $H_{\alpha}$  и NaI) по ядрам и эмиссионным пикам их четко выделенных компонентов. Для асимметричных профилей скорости, соответствующие другим их деталям, приводятся и обсуждаются отдельно.

Данные, относящиеся к одному объекту, обобщенно и наглядно представляются графиком  $V_r(r)$ . Такой график показывает диапазоны глубин линий, встречающихся в данном спектре, и измеренных по ним скоростей, а главное, из него сразу видно, действительно ли они связаны между собой. Если зависимость  $V_r$  от  $r$  существует, ее можно рассматривать как “кинематический разрез” атмосферы. Кавычками выражена оговорка: речь не идет о точной зависимости скорости расширения (или сжатия) некоторого слоя атмосферы от его радиуса. Имеется в виду лишь следующее: поскольку остаточная интенсивность абсорбции растет с оптической глубиной (а для линий близких мультиплетов их связь даже однозначна), смещение на графике в сторону меньших значений  $r$ , т.е. на наших рис. 9–11 слева направо, соответствует подъему из нижних слоев атмосферы в верхние. Но и это остается справедливым лишь до тех пор, пока профиль абсорбции не деформируется

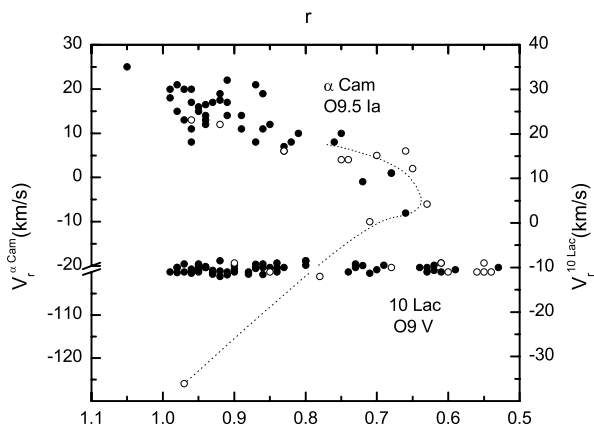


**Рис. 8.** То же, что на рис. 5–6, для линий малой и средней интенсивности. Добавлены HD 168625 B5 Ia-0 и  $\alpha$  Cyg A2 Ia.  
(a) Абсорбции FeII, сверху вниз: 5169, 4233 и 5260, потенциалы возбуждения нижних уровней: 2.9, 2.6 и 10.3 eV соответственно.  
(b) Пары линий AlIII 5697+5723 (заполненные кружки) и SiII 5454+5640 (открытые кружки).  
(c) Абсорбции OII 4415 (заполненные кружки) и FeIII 4420 (открытые кружки).

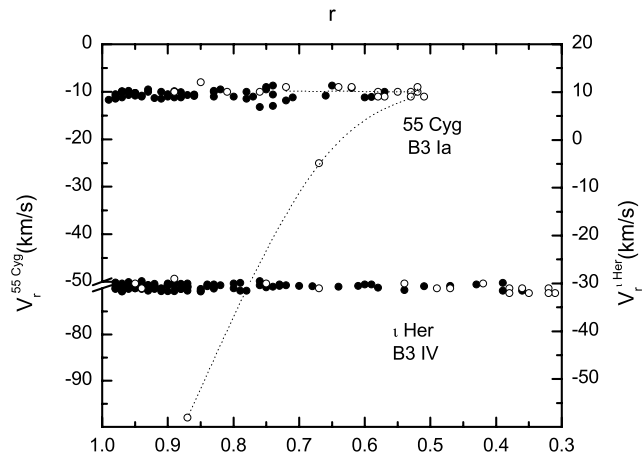
эмиссионной добавкой. В профиле типа P Cyg его абсорбционная составляющая по мере усиления эмиссии все больше сдвигается в синюю сторону. При этом она может терять глубину. В результате, как видно из рис. 9–11, достигнув некоторого минимального значения  $r$ , кривая  $V_r(r)$  изгибается (или даже изламывается), и дальнейшему подъему в атмосфере соответствует уже перемещение по кривой вниз и влево.

На каждом из рис. 9–11 сопоставлены зависимости  $V_r(r)$  для пары объектов. У стационарных звезд сравнения с узкими линиями в спектрах они строго горизонтальны, разброс по вертикали минимален. Для всех сверхгигантов, кроме  $\alpha$  Cam, левые участки зависимостей ( $r > 0.8$ ) также почти горизонтальны. По ним оценены приведенные в табл. 2 значения  $V_r(r \rightarrow 1)$ , которые соответствуют наиболее глубоким слоям атмосфер, еще доступным наблюдениям. Наибольший, обычно отрицательный сдвиг относительно слабых линий показывает абсорбционный компонент  $H_{\alpha}$ . Величина

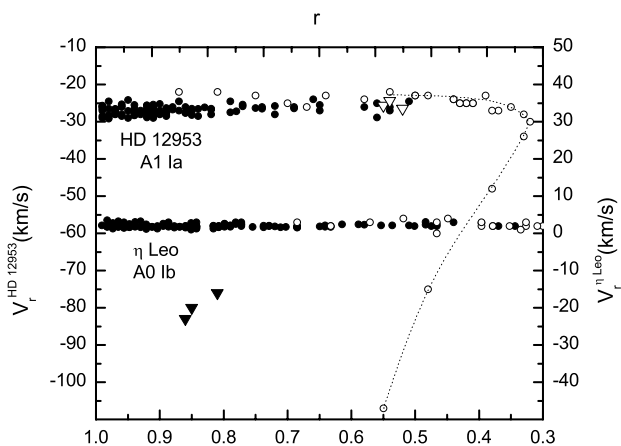




**Рис. 9.** Сопоставление зависимостей  $V_r(r)$  для сверхгиганта  $\alpha$  Cam O9.5 Ia и карлика 10 Lac O9 V. Открытыми кружками показаны линии водорода.



**Рис. 10.** То же, что на рис. 9, для сверхгиганта 55 Cyg B3.0 Ia и карлика  $i$  Her B3 IV.



**Рис. 11.** То же, что на рис. 9–10, для гипергиганта HD 12953 A1.0 Ia-0 и слабого сверхгиганта  $\eta$  Leo A0 Ib. Открытыми и закрытыми треугольниками показаны основные и вторичные компоненты линий FeII(42) соответственно.

этого сдвига указана в табл. 2 как  $\Delta V_r(H_\alpha)$ . Обе величины округлены до целых км/с.

Радиальный градиент скорости в атмосфере горячего сверхгиганта, определяющий величину дифференциальных сдвигов линий и влияющий на форму кривой  $V_r(r)$ , увеличивается как с температурой, так и со светимостью. Как видно из сопоставления рис. 9, 10 и 11, точки поворота на кривых  $V_r(r)$  и их нижние концы под влиянием обоих факторов смещаются вправо при переходе от  $\alpha$  Cam к 55 Cyg и далее к HD 12953.

Наиболее нагляден случай  $\alpha$  Cam — рис. 9. Значение  $V_r$  монотонно уменьшается от 20 до  $-5$  км/с при переходе от слабых абсорбций HeII, CIII,

CIV и других ионов к сильным линиям HeI и H: расширением охвачены все доступные наблюдениям слои атмосферы. Дальнейшее резкое падение скорости до  $-126$  км/с прослеживается только по водородным линиям (бальмеровский прогресс) и сопровождается увеличением  $r$  — от 0.63 у  $H_\gamma$  до 0.97 у  $H_\alpha$ . Уменьшение скорости с углублением абсорбции у  $\alpha$  Cam показывают также и линии HeI — “гелиевый прогресс”, а у белых гипергигантов, в частности у 6 Cas A2.5 Ia-0, даже линии FeII — “железный прогресс” [24].

Зависимость  $V_r(r)$  для 55 Cyg, представленная на рис. 10, отличается от таковой для  $\alpha$  Cam. Это горизонтальная прямая с резким изломом на  $r = 0.52$ . Такая форма кривой  $V_r(r)$  характерна для большинства наших В-сверхгигантов, причем с переходом от ранних подклассов В к поздним наблюдается отмеченное выше плавное смещение вправо точки поворота — от 0.59 для HD 13854 B1.2 Ia до 0.42 для  $\beta$  Ori B8.0 Ia. Исключение составили два объекта: у  $\epsilon$  Ori первые члены серии Бальмера показывают изменение скорости с интенсивностью, но это не “прогресс”, а “регресс”, а у 67 Ori (так же, как у  $\eta$  Leo) скорость не зависит от интенсивности для всех линий, что естественно для сверхгигантов Ib. Кривая  $V_r(r)$  для 9 Ser также отчетливо реагирует на пониженную светимость этого сверхгиганта. Профиль  $H_\alpha$  у 9 Ser резко отличается от таковых у соседних HD 13854 и 55 Cyg. Сильно различаются и сдвиги абсорбционных компонентов  $H_\alpha$  (4 колонка табл. 2): у HD 13854 и 55 Cyg они составляют  $-143$  и  $-88$  км/с соответственно, в то время как у 9 Ser всего  $-19$  км/с. У  $\beta$  Ori, как и у других сверхгигантов поздних подклассов В, заметны небольшой рост  $V_r$  с глубиной абсорбции и систематический отрицательный сдвиг линий FeII

относительно линий HeI. Возможно, эти эффекты вызваны наличием в их атмосферах крупномасштабных восходящих и нисходящих потоков [25].

Рис. 11 демонстрирует резкое повышение ветровой активности у HD 12953 по сравнению с  $\eta$  Leo. Она проявляется не только в бальмеровском прогрессе, начинающемся с  $H_\epsilon$ , но и в описанной в разд. 3 деформации профилей линий FeII(42): депрессии на их синих крыльях дают примерно те же скорости, что  $H_\beta$  (закрытые треугольники на рис. 11). В свою очередь синесмещенные компоненты видны также в  $H_\beta$  и  $H_\alpha$ , у последней слабый компонент смещен относительно основного, глубокого, на  $-80$  км/с.

Таким образом, даже небольшая коллекция кривых  $V_r(r)$  демонстрирует полезность их использования хотя бы при обобщении наблюдательных данных о кинематике атмосфер сверхгигантов и при отслеживании ее временных изменений. Они не столь информативны, как зависимости  $V_r(\tau)$ , но так же индивидуальны: у каждого объекта своя кривая, хотя и переменной, но характерной для него формы. Если спектрофотометрическим паспортом звезды служит спектральный класс, то кривая  $V_r(r)$  может служить ее кинематическим паспортом.

## 6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В нашем атласе собраны спектры высокого разрешения голубых и белых сверхгигантов, охватывающие интервал длин волн от 3600 до 7800 Å. Каждый из объектов представлен в нем единственным спектром, взятым из архивов САО РАН. Привлечение нескольких спектров для одного и

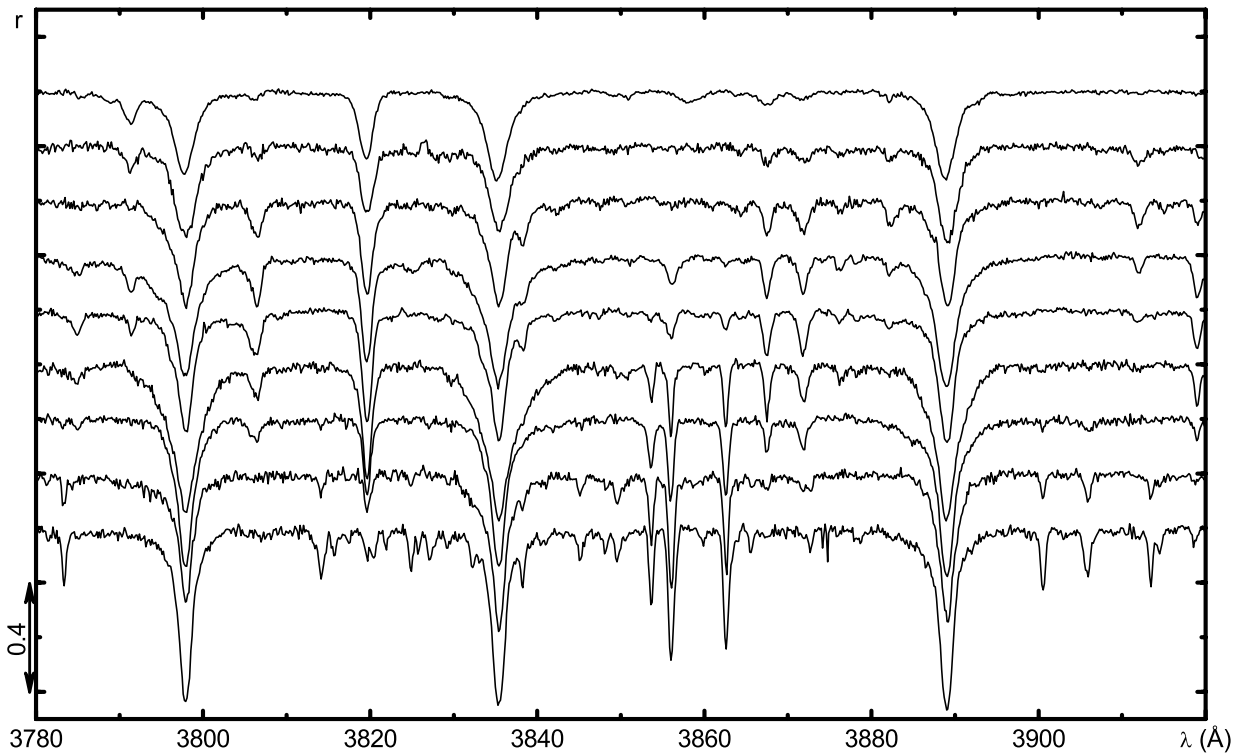
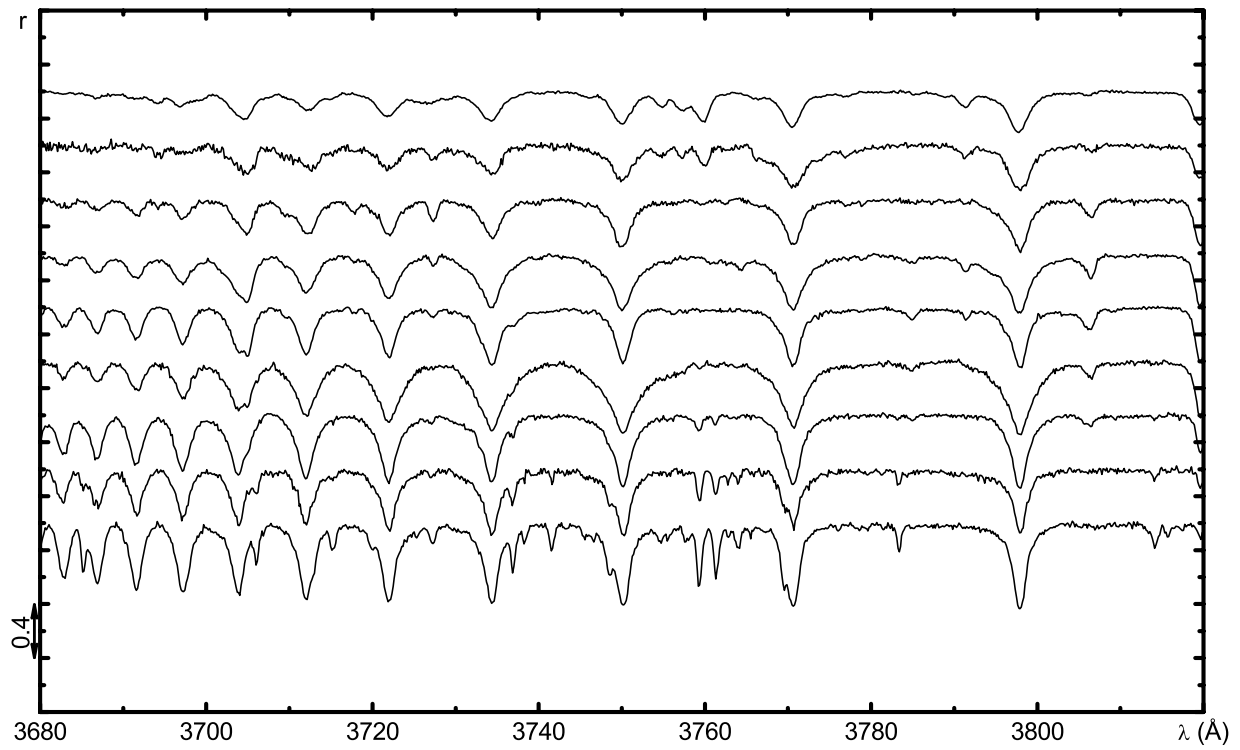
того же объекта было бы очень полезно, т.к. позволило бы, с одной стороны, продемонстрировать характерную для сверхгигантов спектральную переменность, а с другой — компенсировать заметное понижение отношения сигнал-шум в ультрафиолетовой области. Однако и наш вариант атласа успешно выполняет свое основное назначение — показать эволюцию спектра звезды-сверхгиганта в интервале спектральных классов от O9 до A1. Сведение вместе, детальное описание и сопоставление спектров, даже полученных для других целей, дало очень ценную информацию. В нашу задачу не входило извлечение и переработка всей этой информации. Мы ограничились примерами использования атласа для отождествления спектральных деталей, получения новых эффективных длин волн и классификационных критериев, качественного описания кинематики атмосфер звезд высокой и наивысшей светимости. Можно надеяться, что найдутся и другие виды его применения.

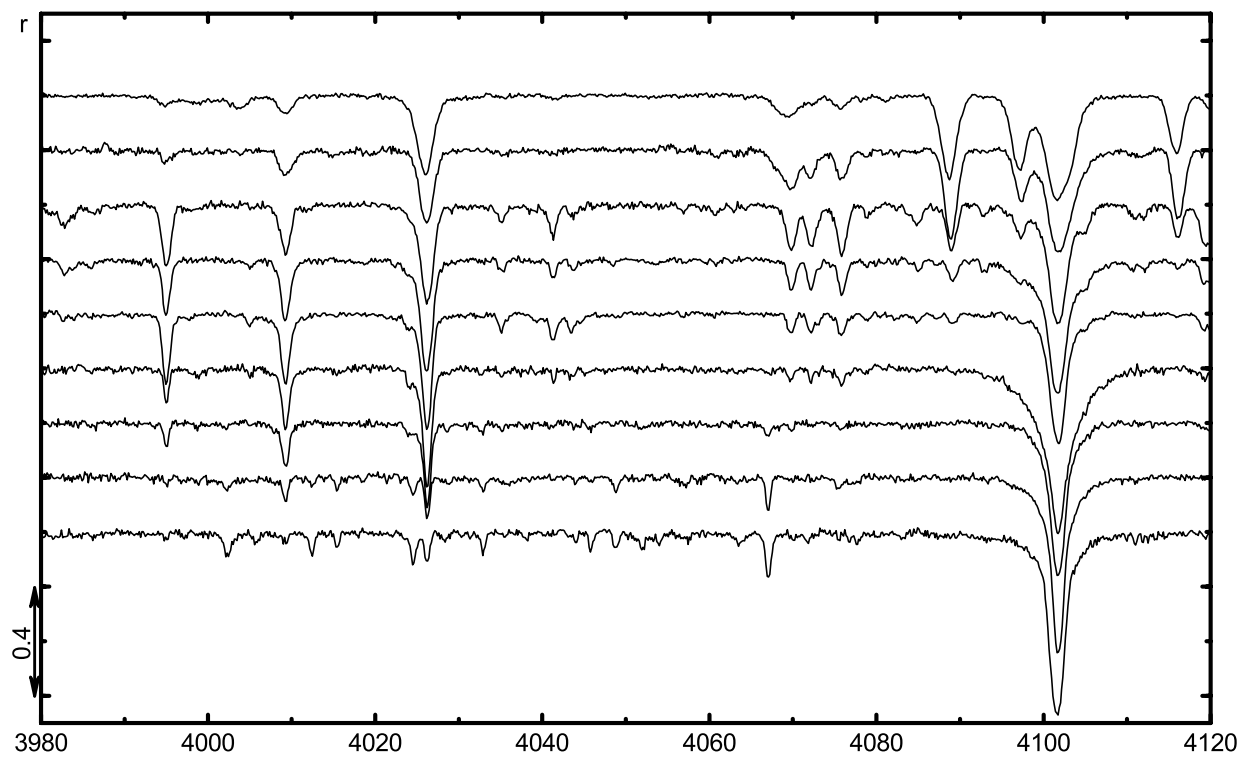
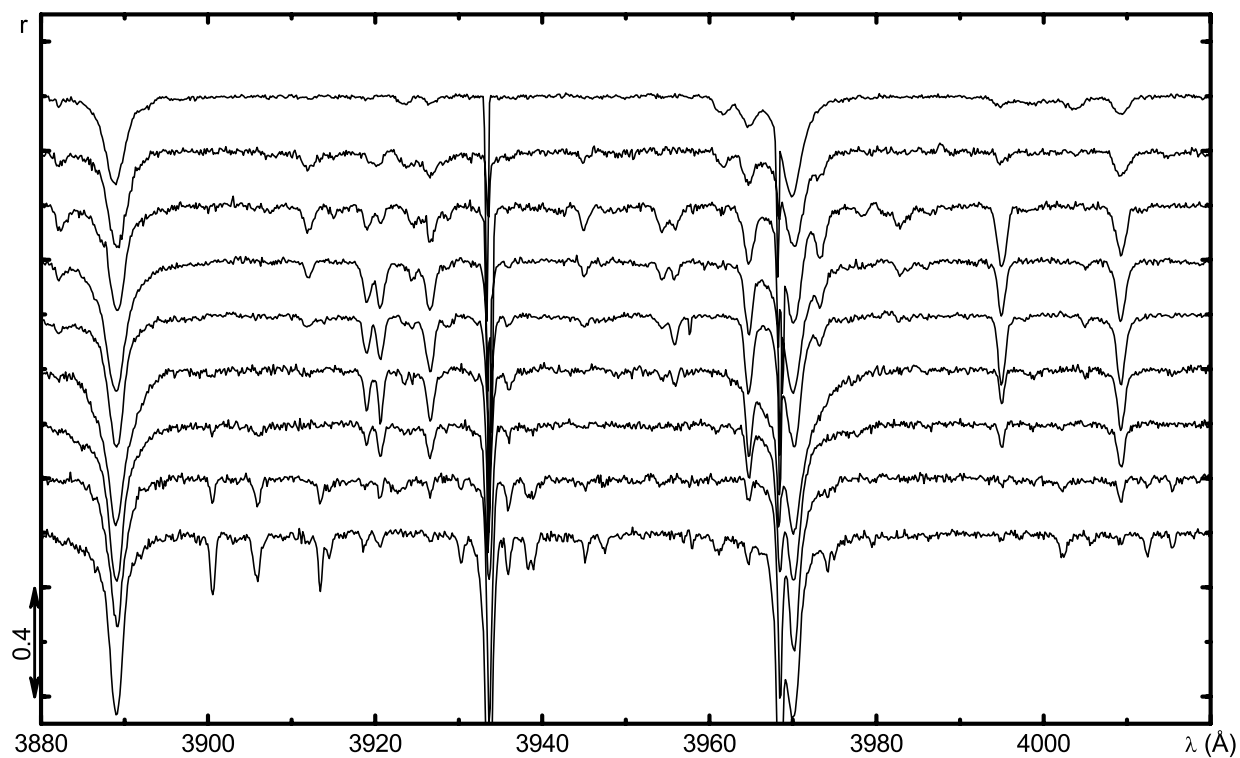
Что касается самих объектов, то работа над атласом привела нас к необходимости изменить статус, по крайней мере, для двух из них. Это HD 13854 и HD 12953, входящие в одну и ту же ассоциацию, Peg OB1. Первая звезда до сих пор классифицировалась как B1 Iab, вторая как A1 Ia. В обоих случаях речь идет о существенном повышении класса светимости. Наши данные о лучевых скоростях, дифференциальных сдвигах и аномалиях профилей линий в согласии с приведенными в разд. 4 спектрофотометрическими данными позволяют считать HD 13854 сверхгигантом Ia, а HD 12953 — гипергигантом Ia-0. Этому не противоречат оценки абсолютных величин звезд по их принадлежности к ассоциации, они дают для них:  $M_V \sim -6.9^m$  и  $M_V \sim -8.0^m$  соответственно.

*Appendix*

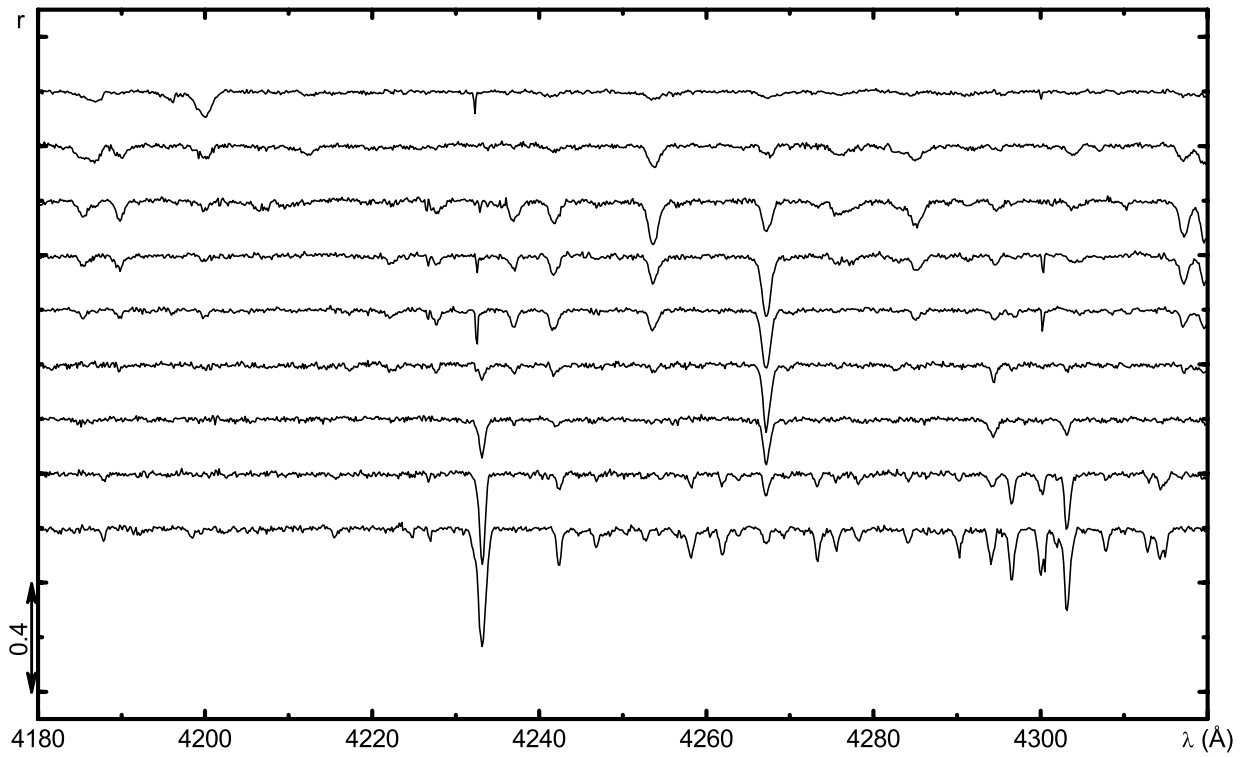
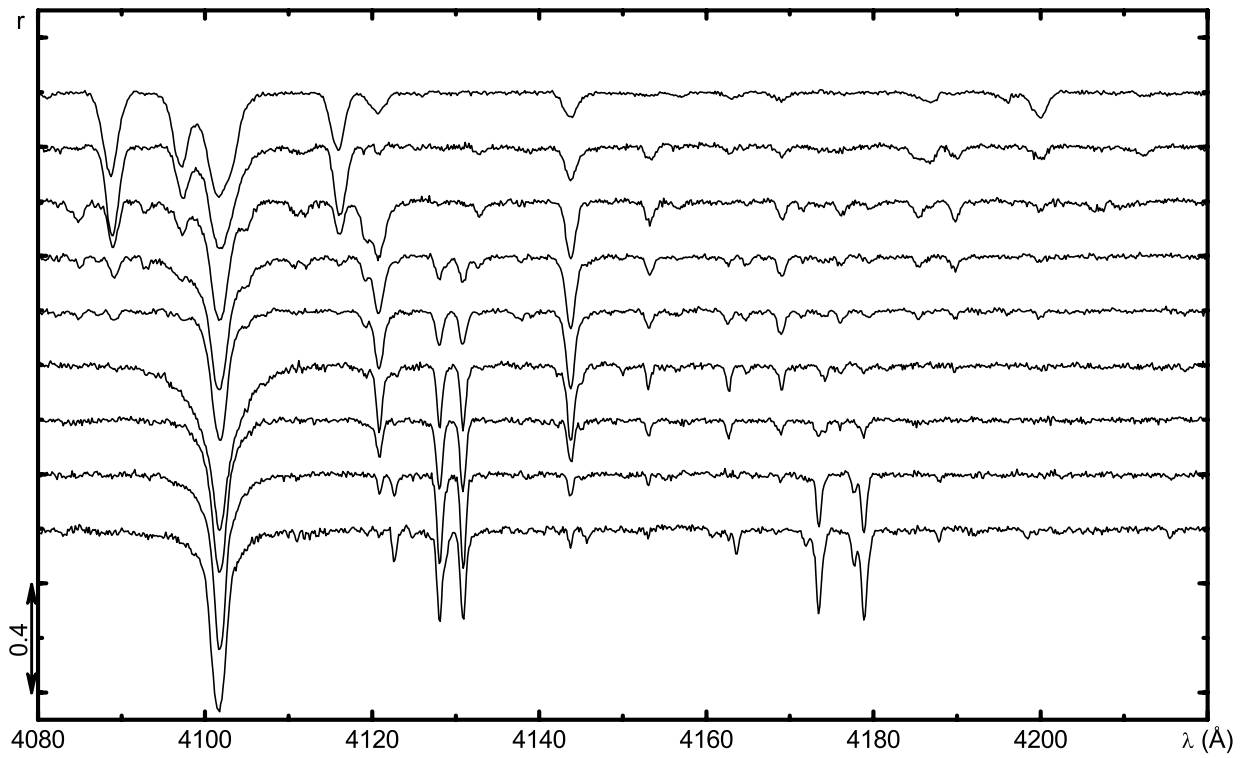
## АТЛАС СПЕКТРОВ СВЕРХГИГАНТОВ O9.5–A1

В атласе приведены зависимости  $r(\lambda)$  для сверхгигантов O9.5–A1. Ось  $\lambda$  размечена по лабораторным длинам волн слабых линий. По оси  $r$  во всех фрагментах, кроме двух, графики раздвинуты по вертикали на 0.2. Исключение сделано для участков вблизи бальмеровского предела (3680–3820 Å) и  $H_\alpha$  (6480–6620 Å), где взаимное смещение составляет 0.4. Графики размещены один под другим в том же порядке, что и объекты в табл. 1, т. е. сверху вниз:  $\alpha$  Cam O9.5 Ia,  $\epsilon$  Ori B0.0 Ia, HD 13854 B1.2 Ia, 9 Cep B2.3 Ib, 55 Cyg B3.0 Ia, 67 Ori B4.2 Ib,  $\beta$  Ori B8.0 Ia, 1H Cam A0.0 Ia, HD 12953 A1.0 Ia–0.

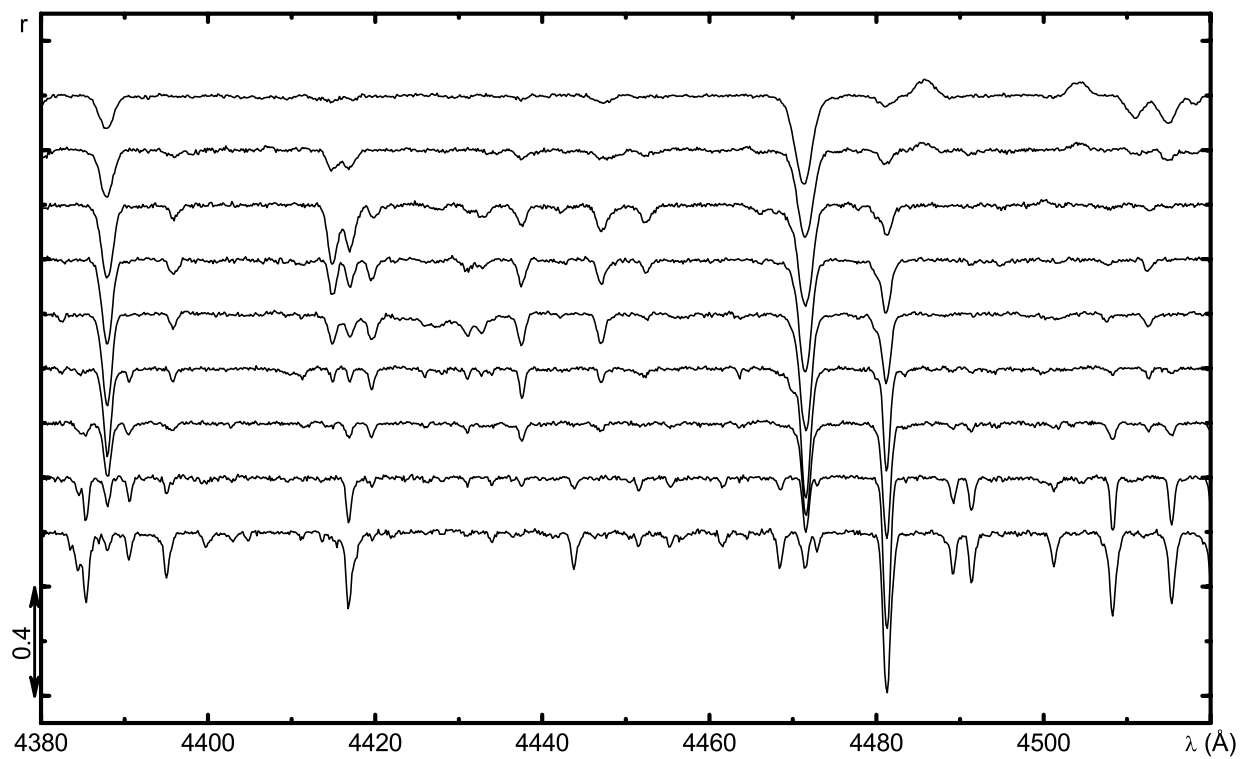
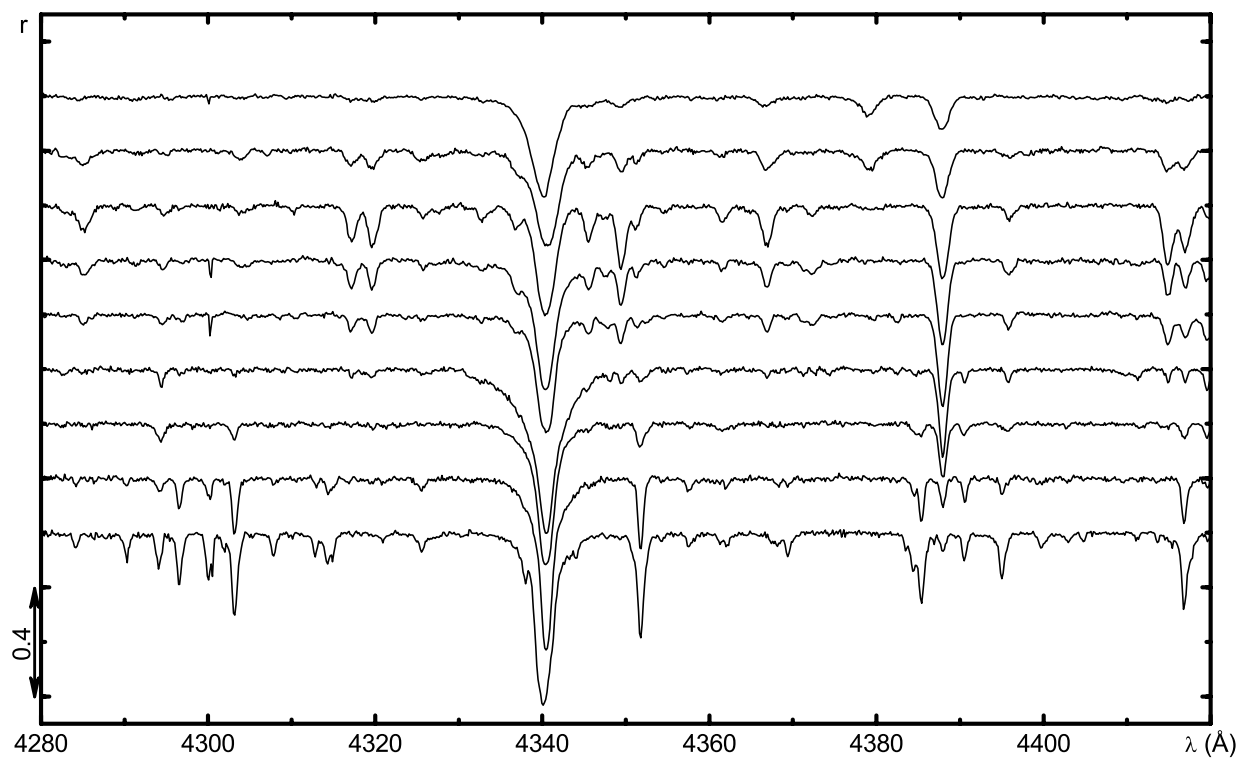
Зависимости  $r(\lambda)$  для сверхгигантов O9.5–A1.



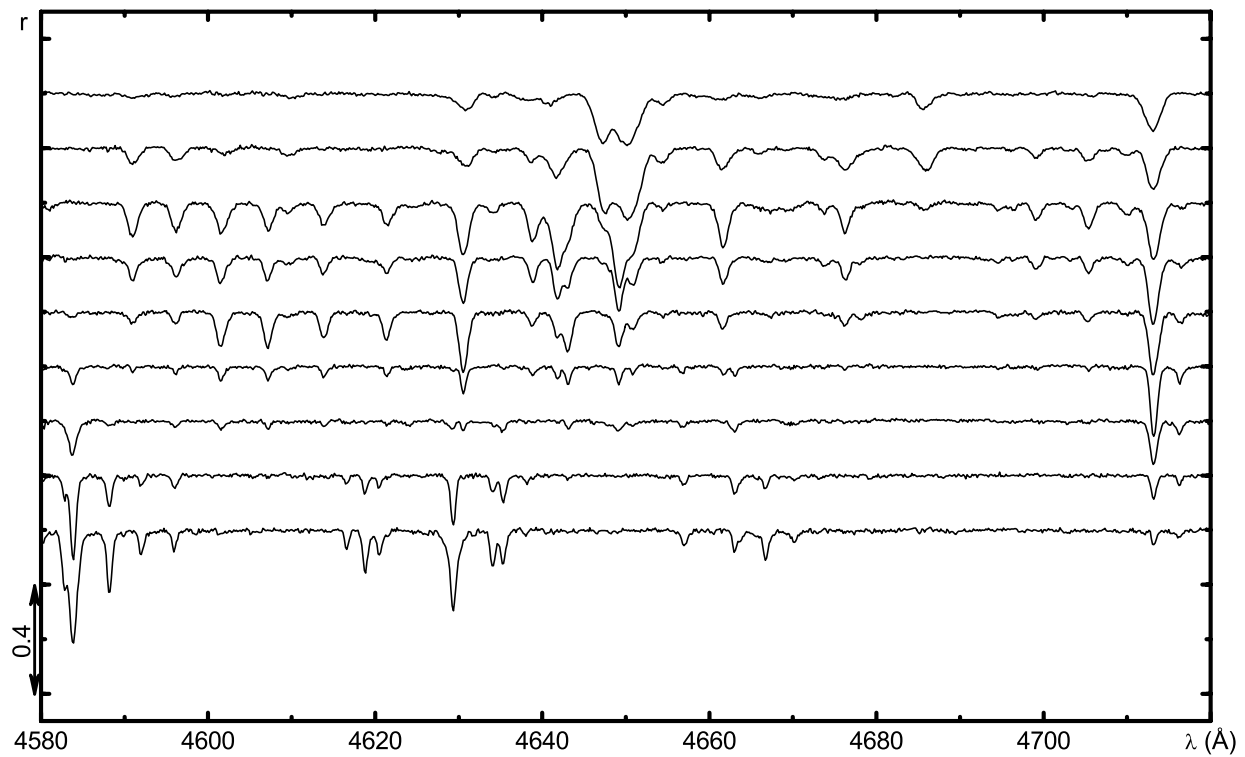
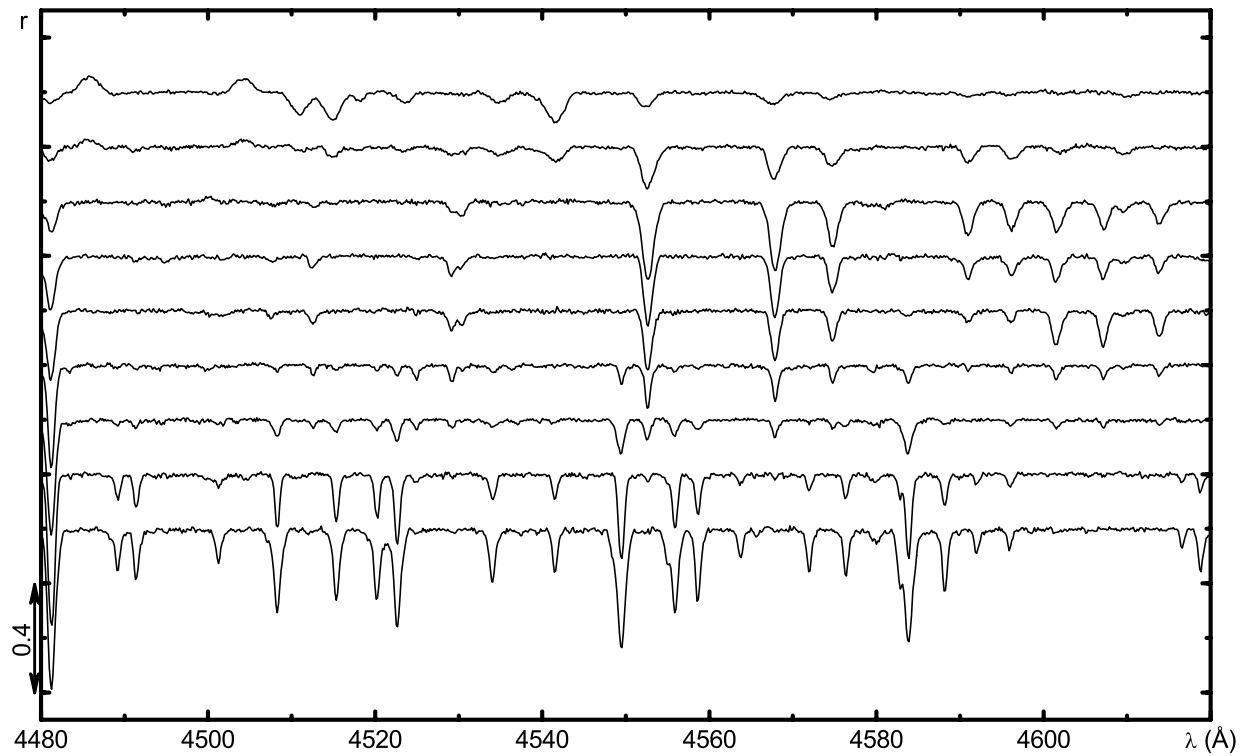
(Продолжение)



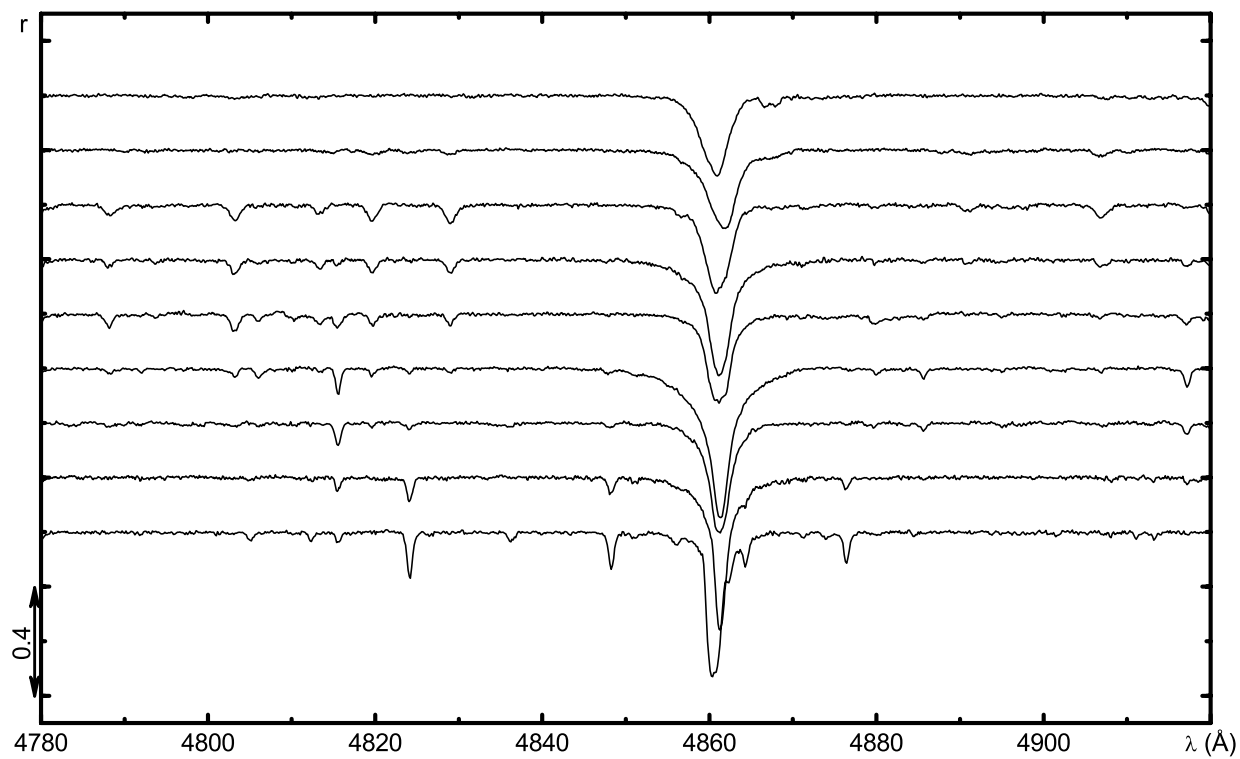
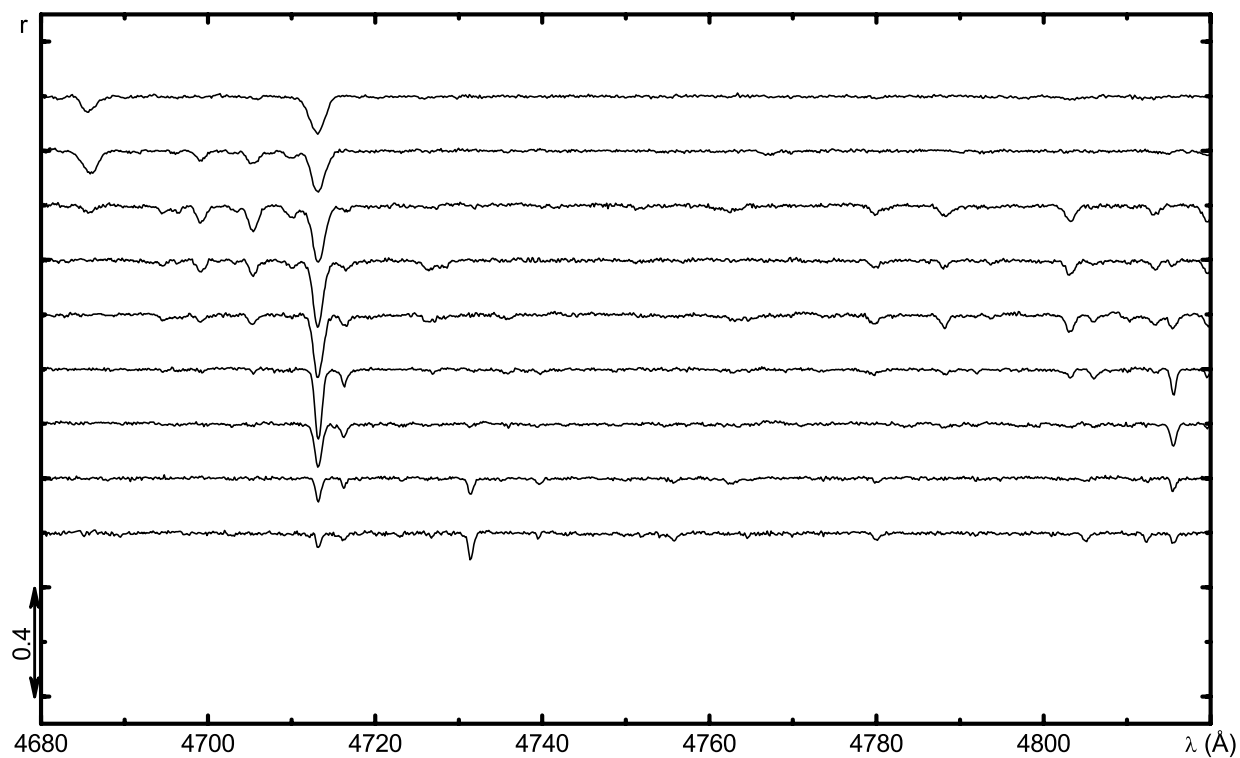
(Продолжение)



(Продолжение)

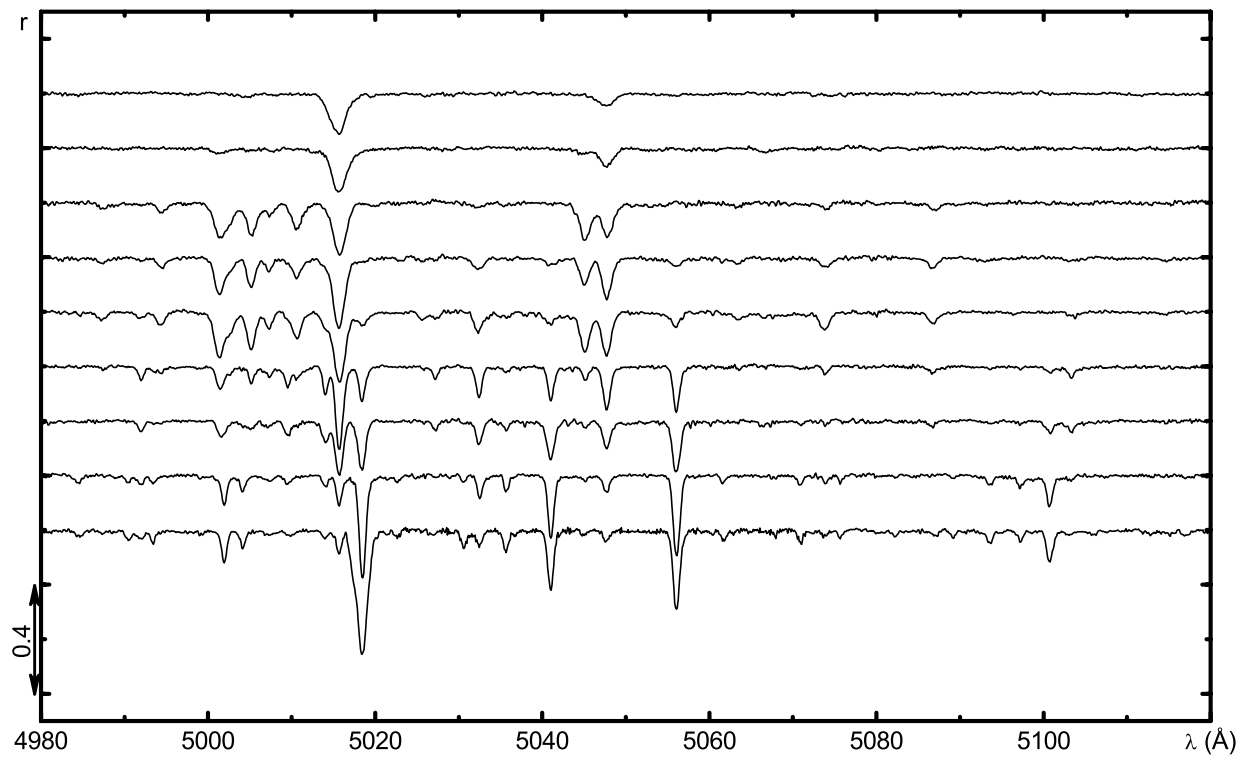
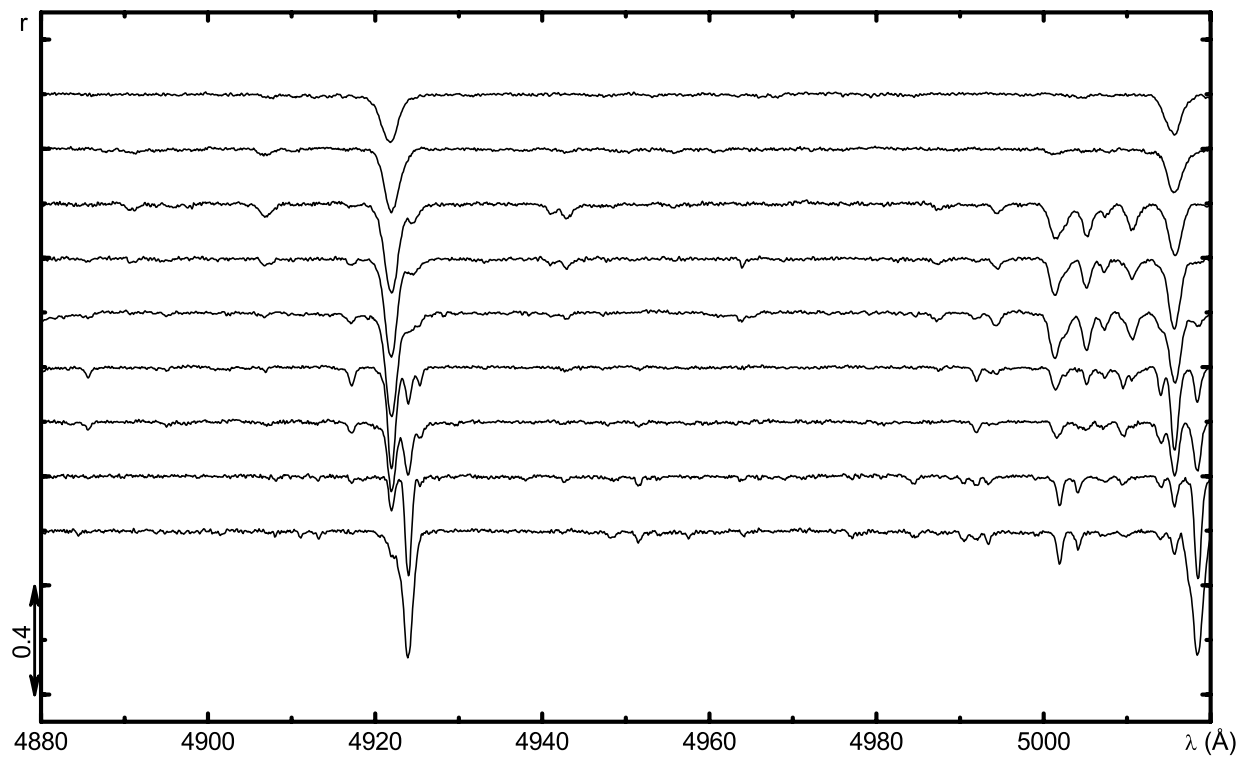


(Продолжение)

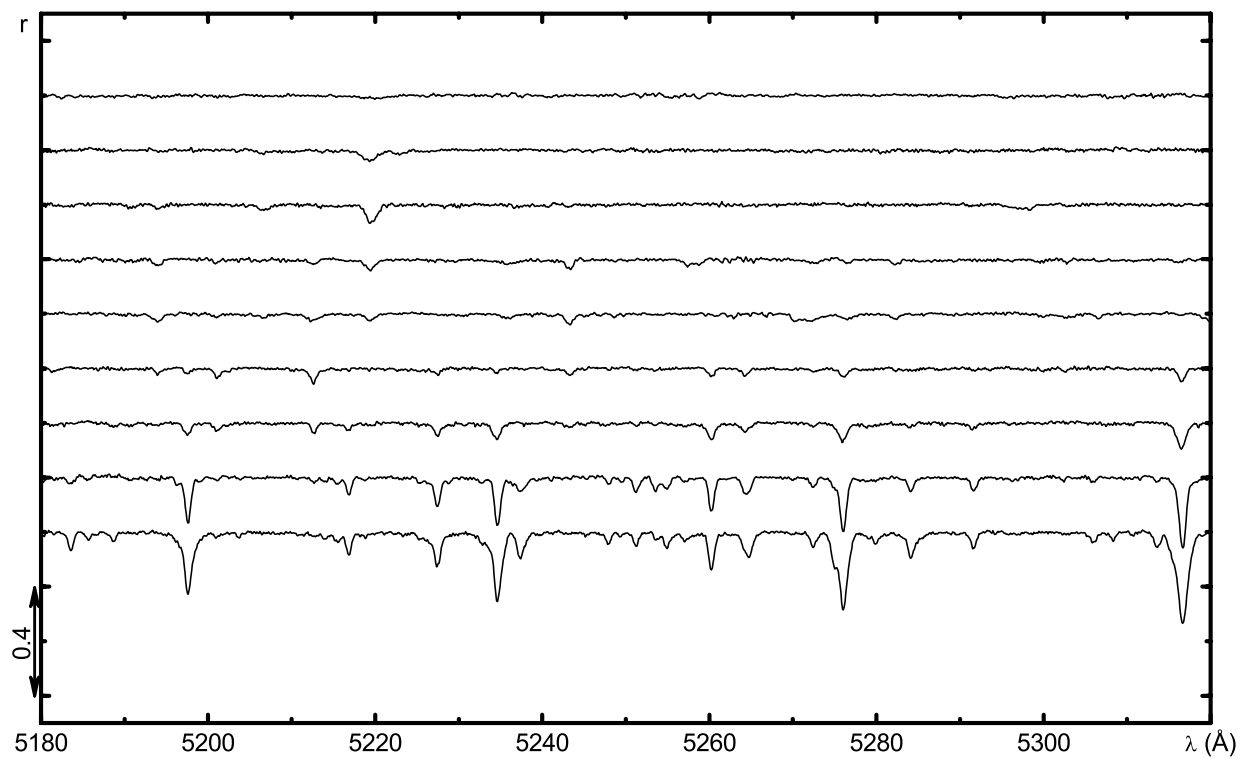
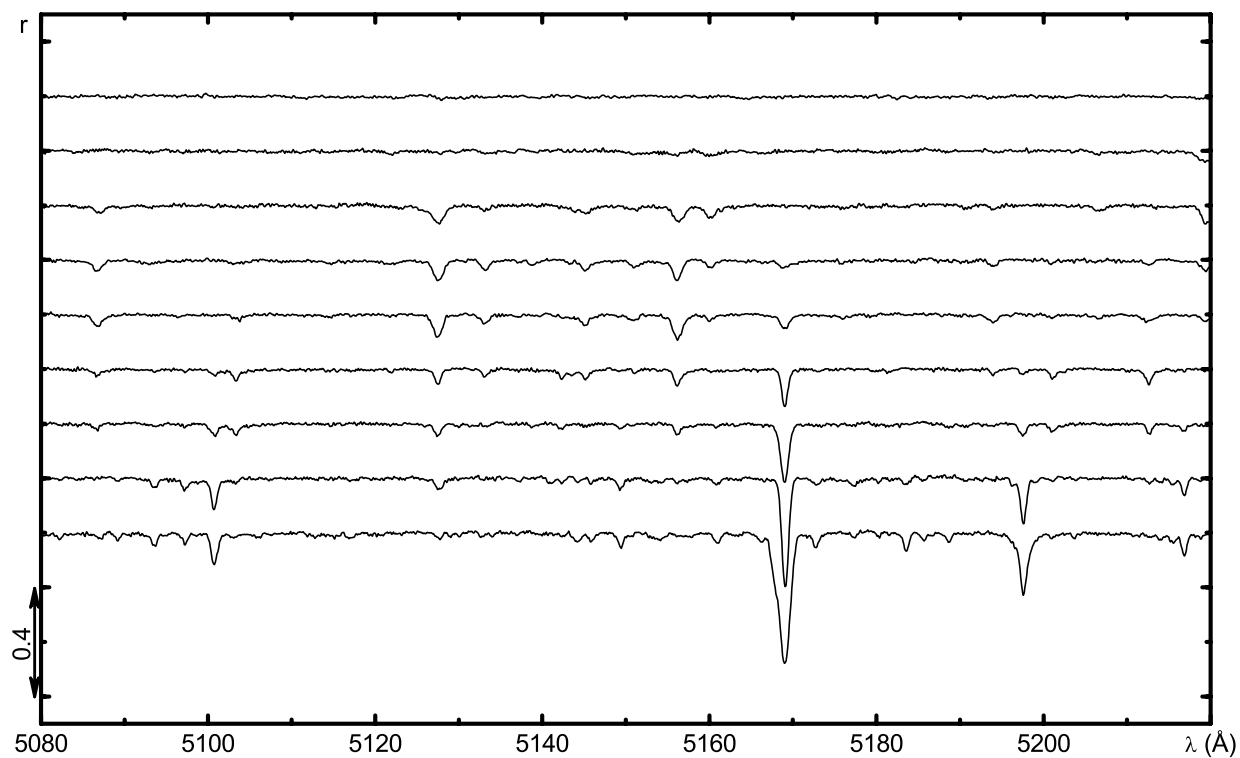


(Продолжение)

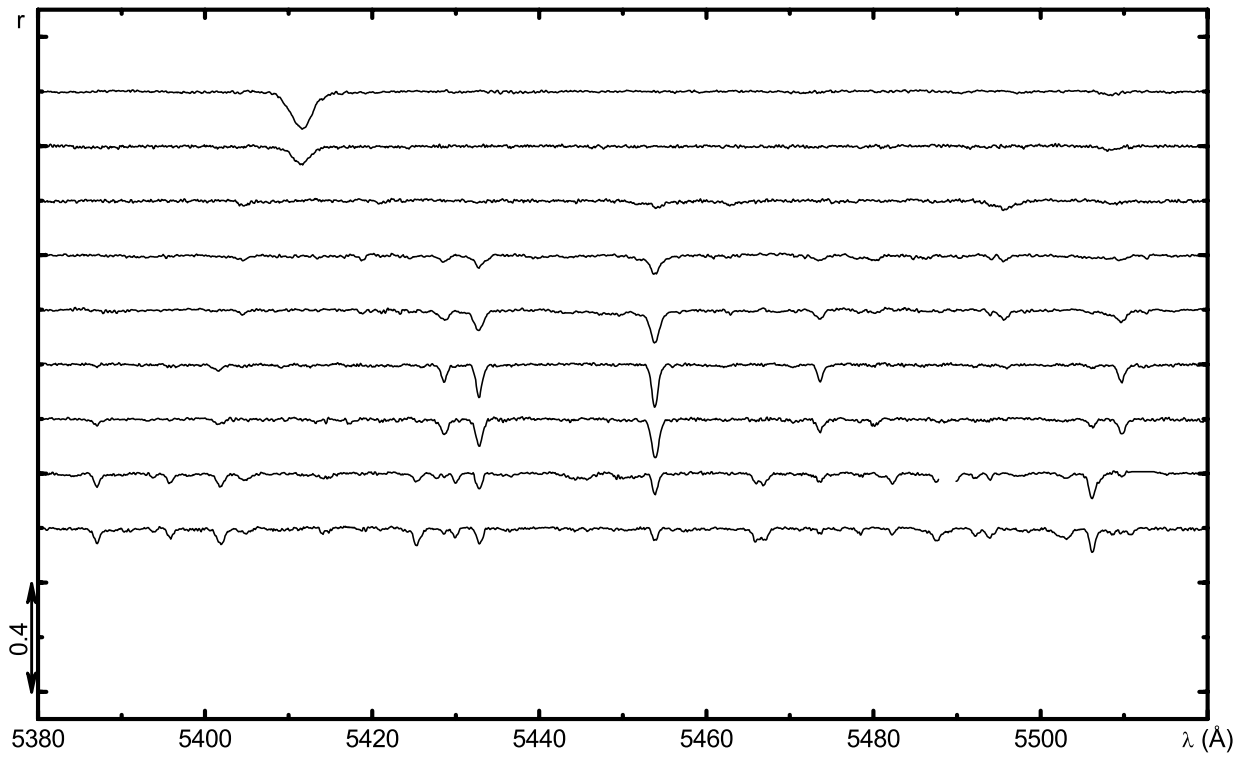
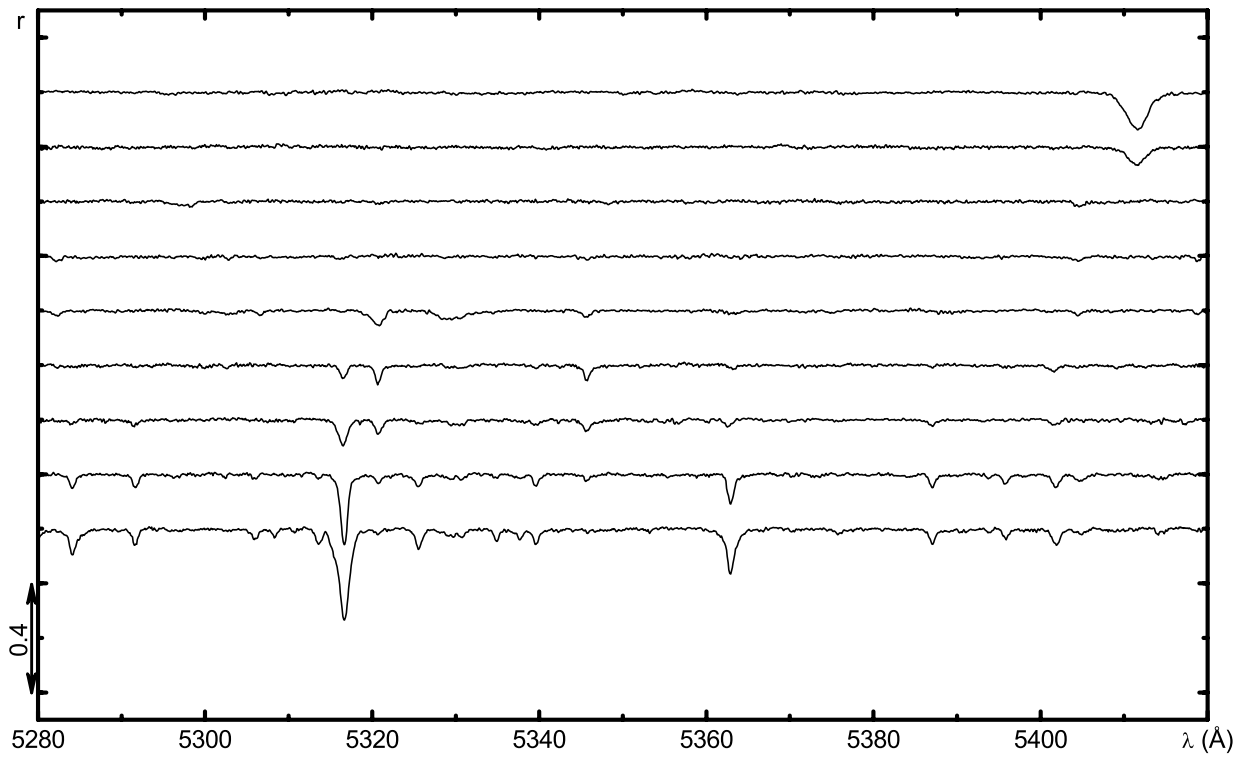




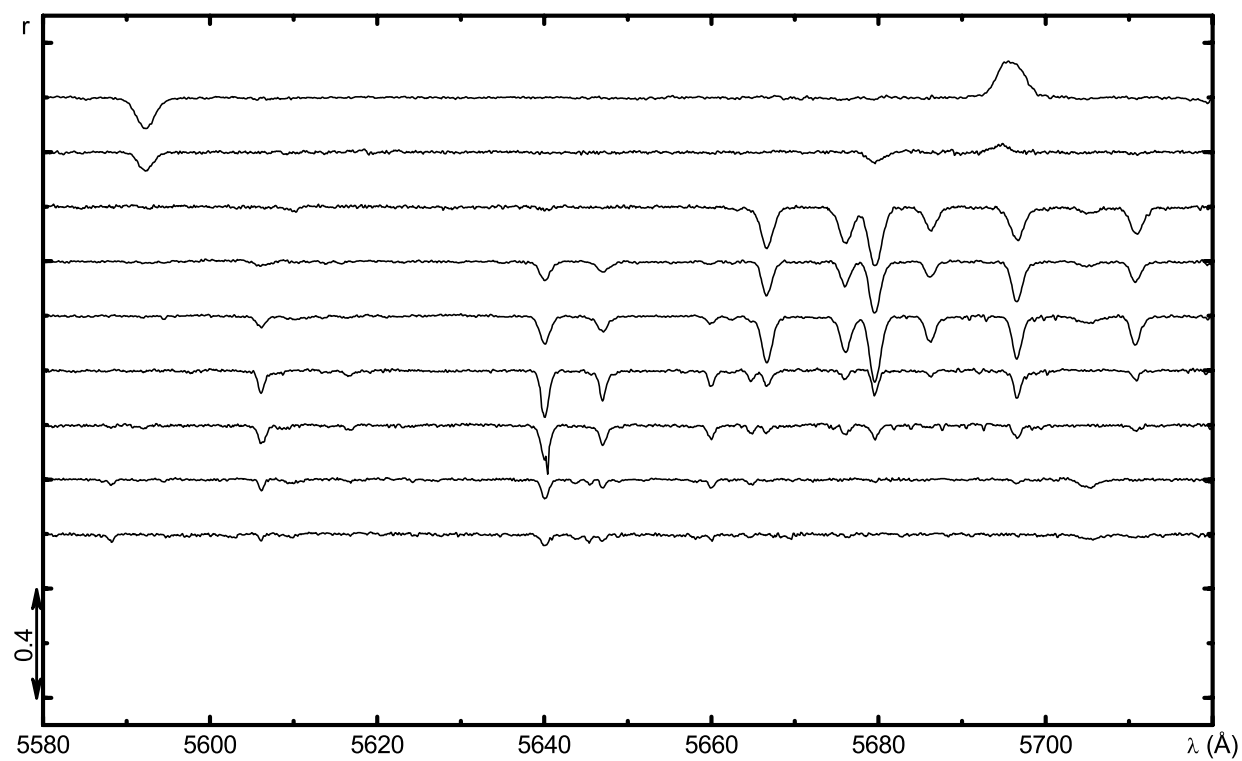
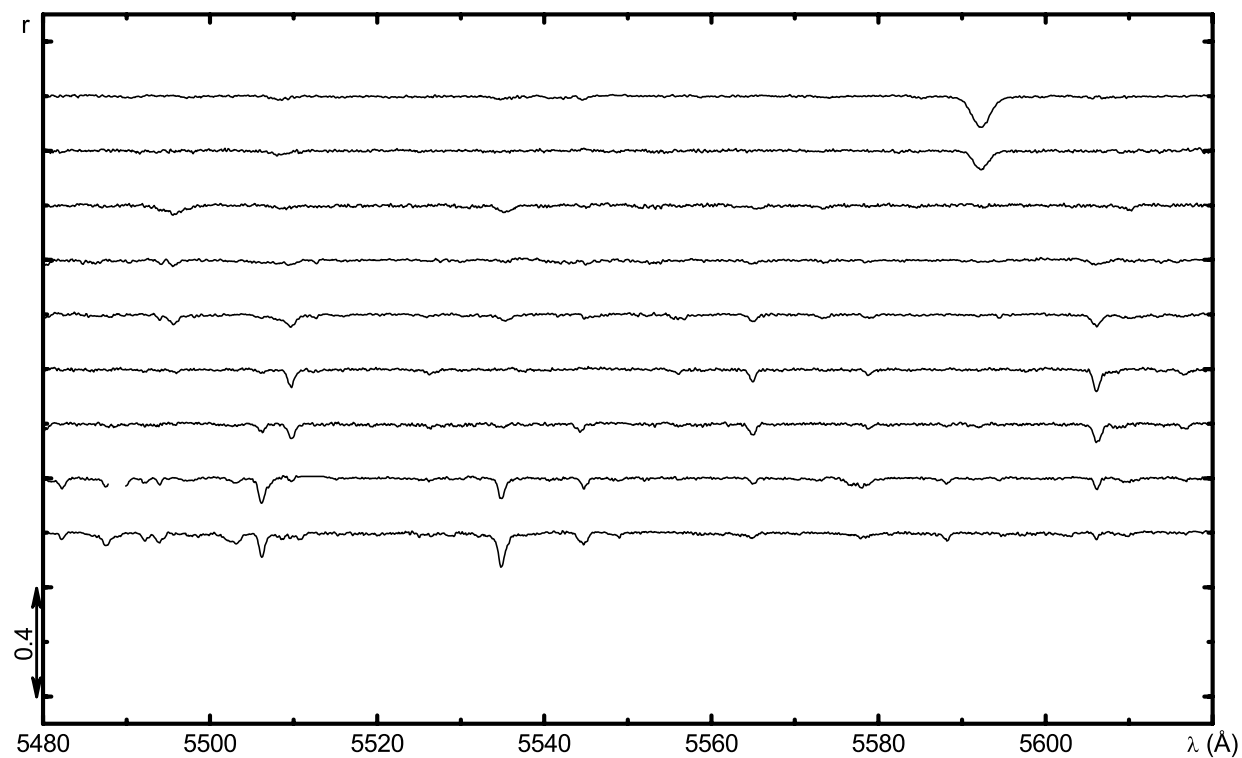
(Продолжение)



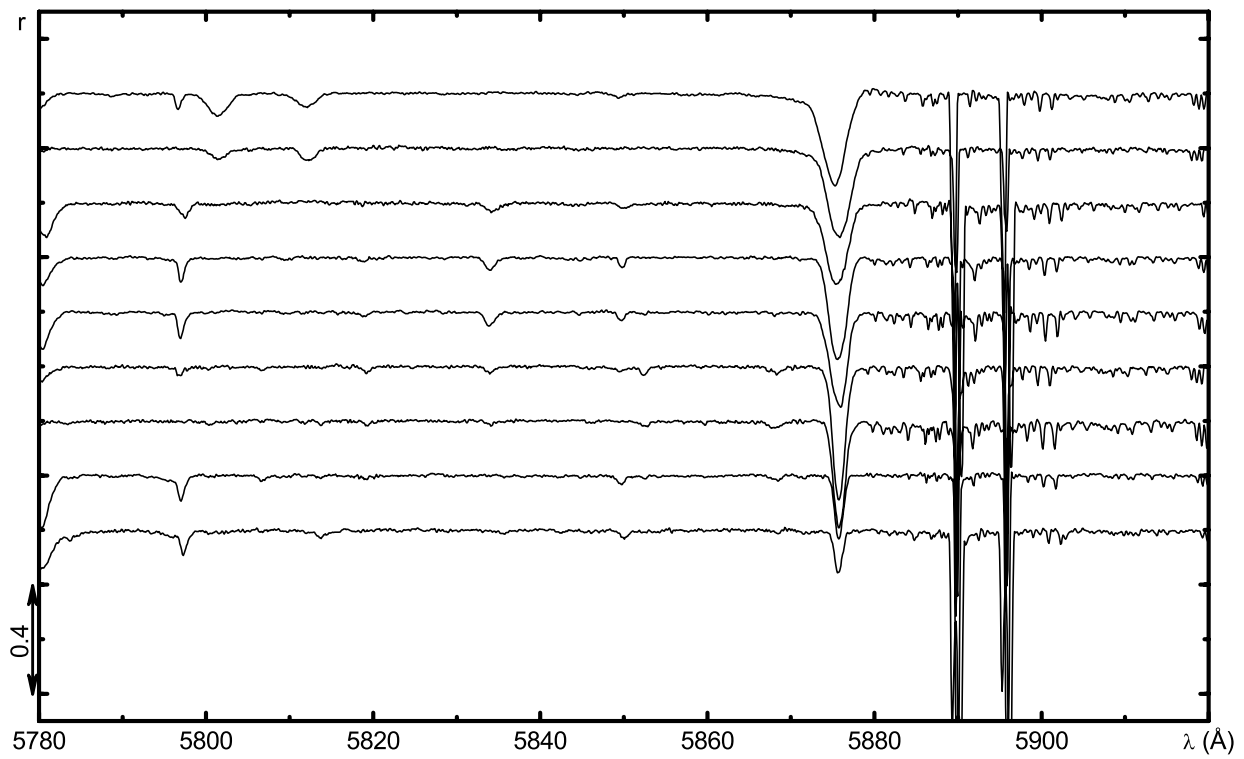
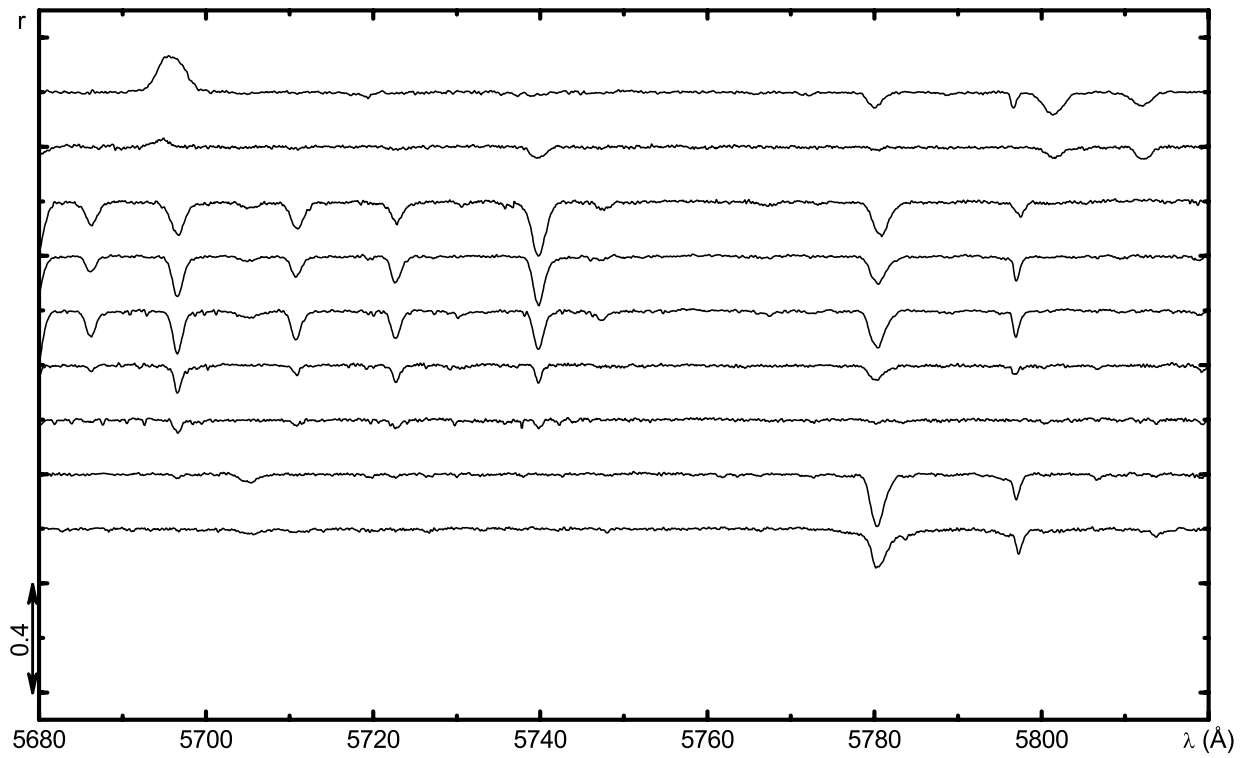
(Продолжение)



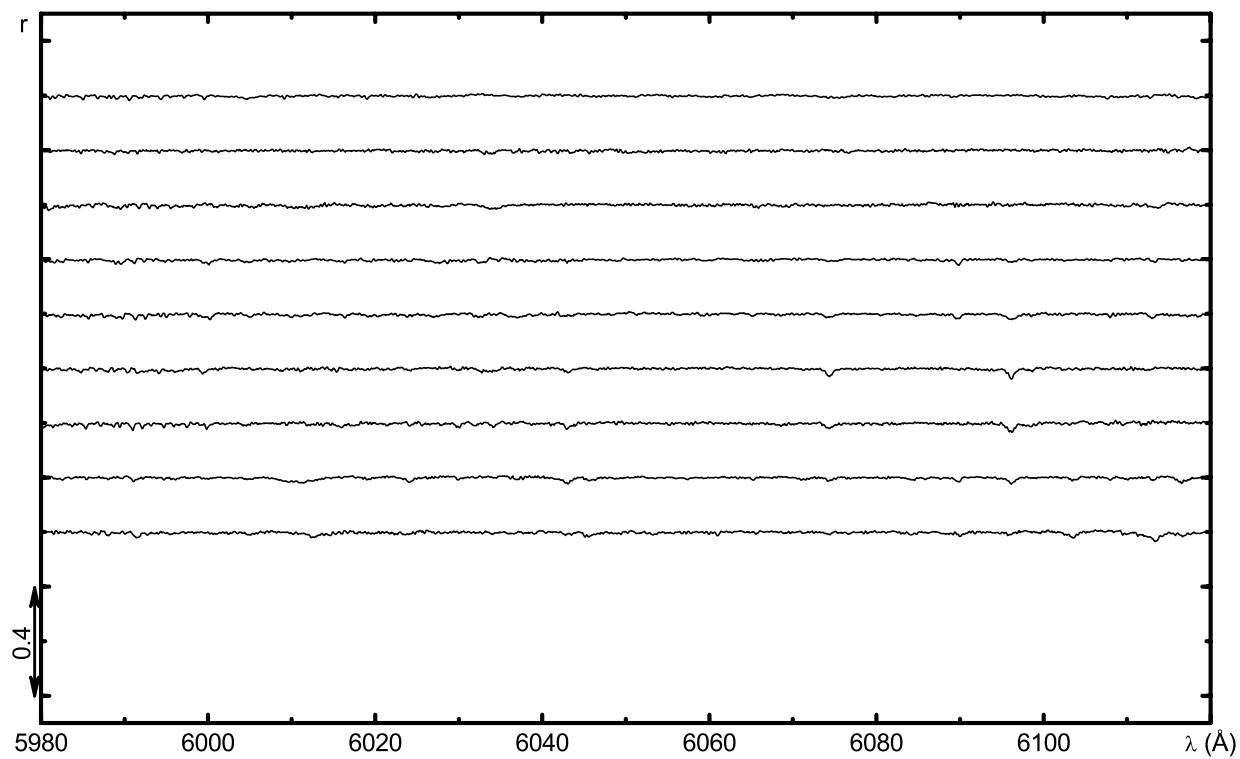
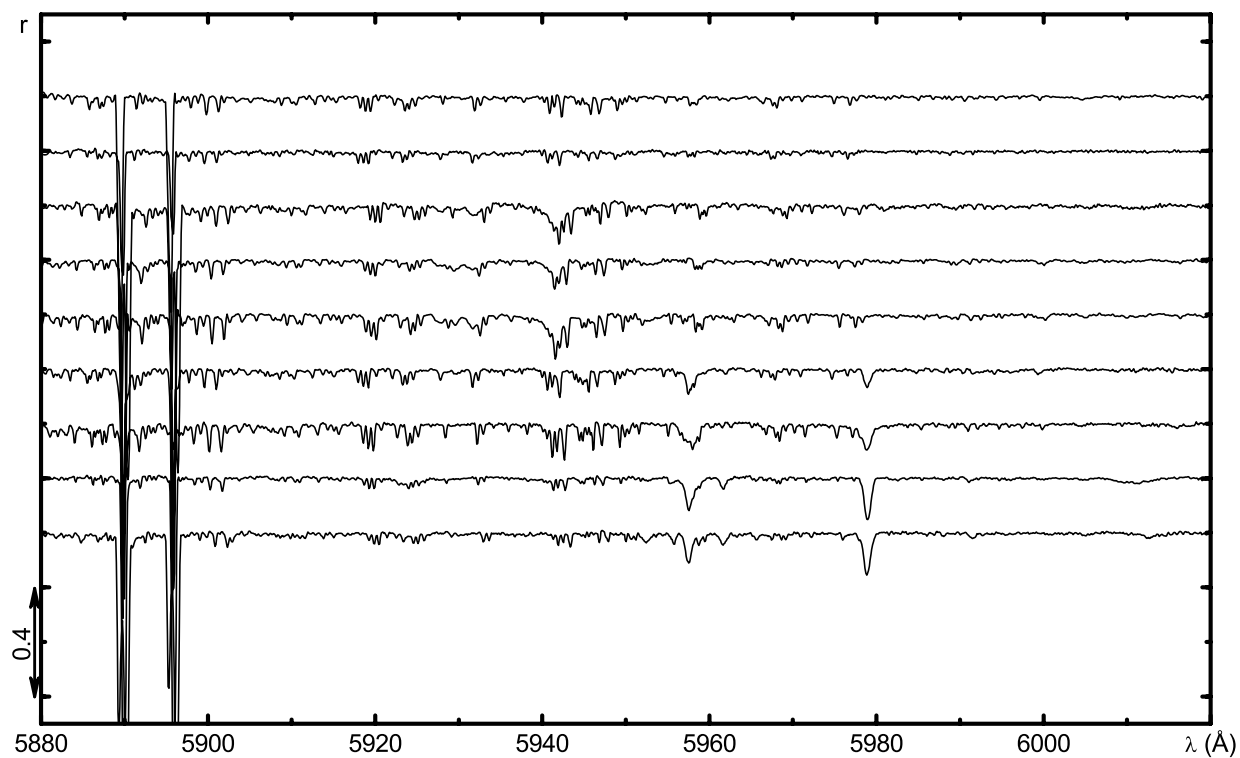
(Продолжение)



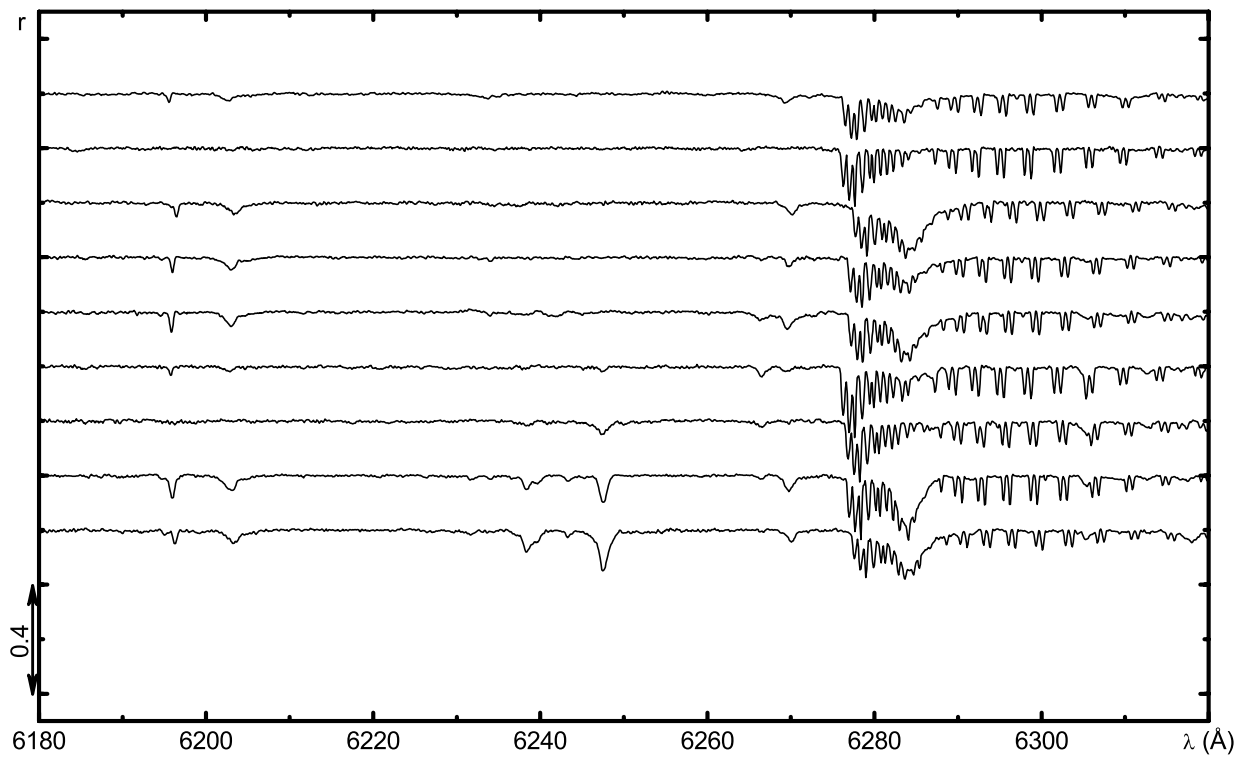
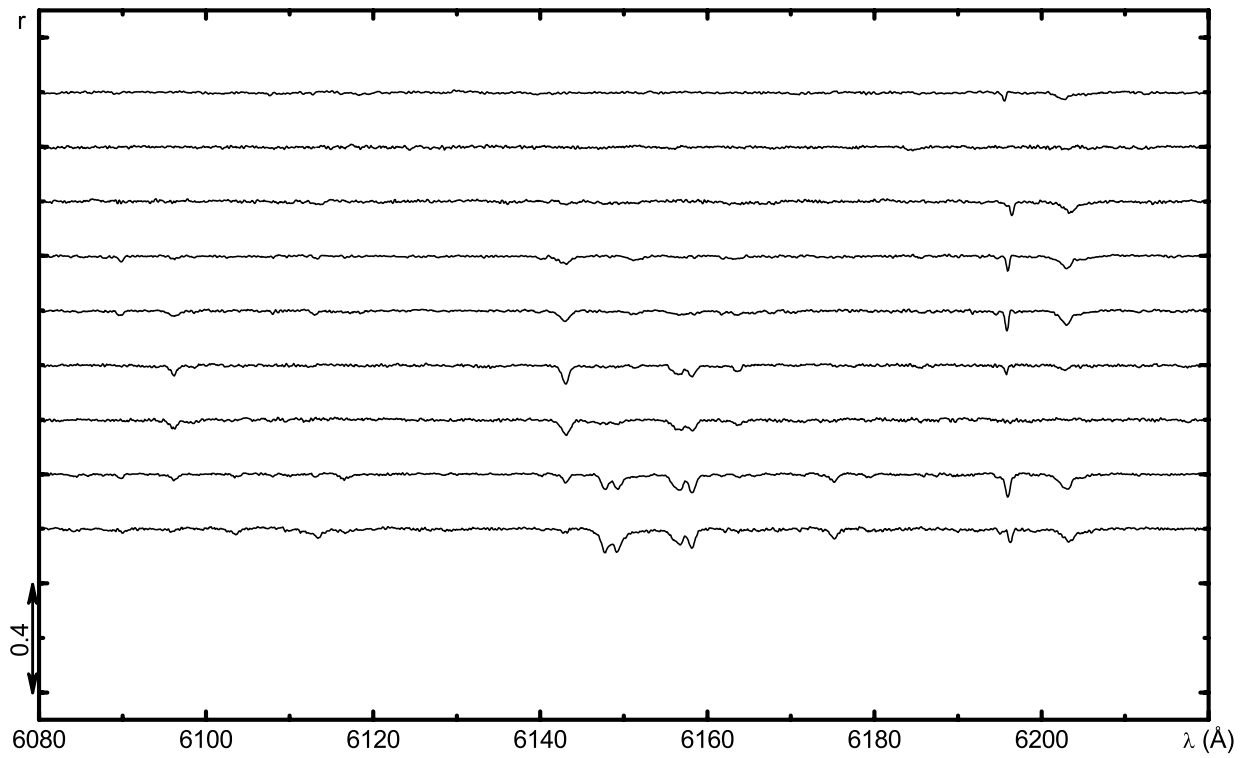
(Продолжение)



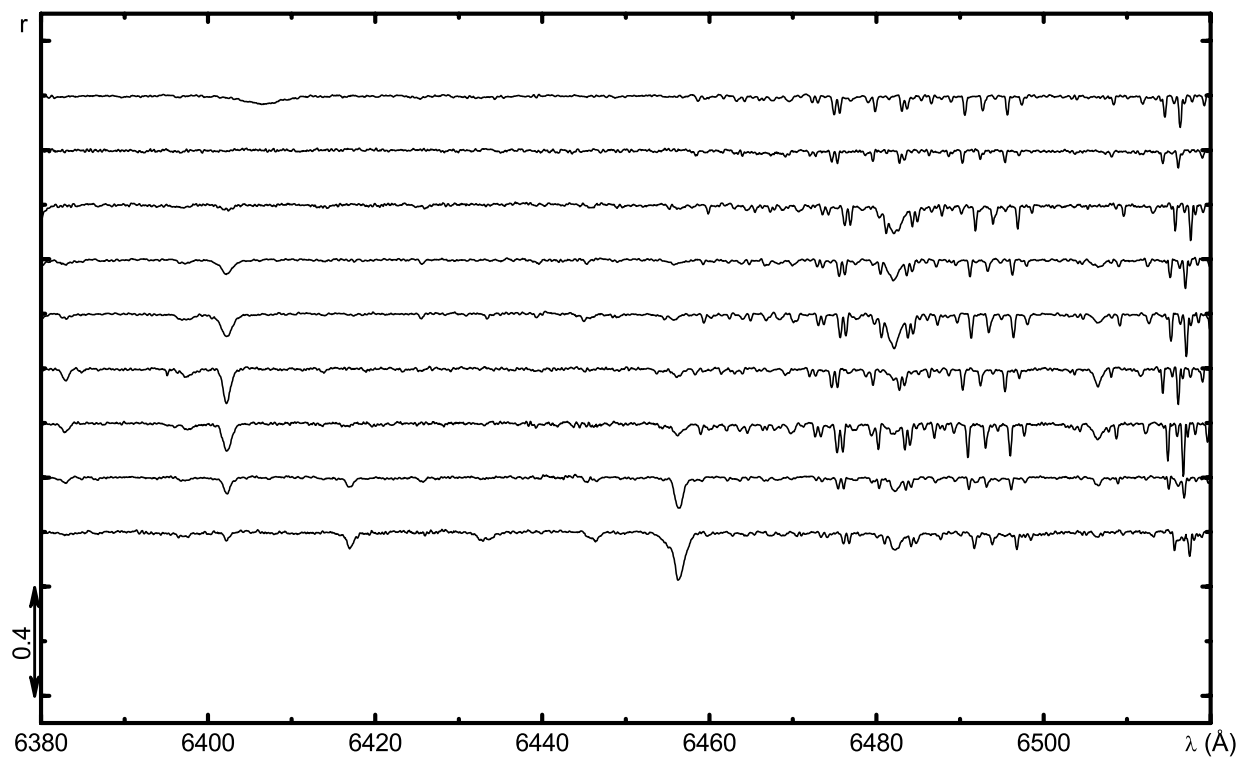
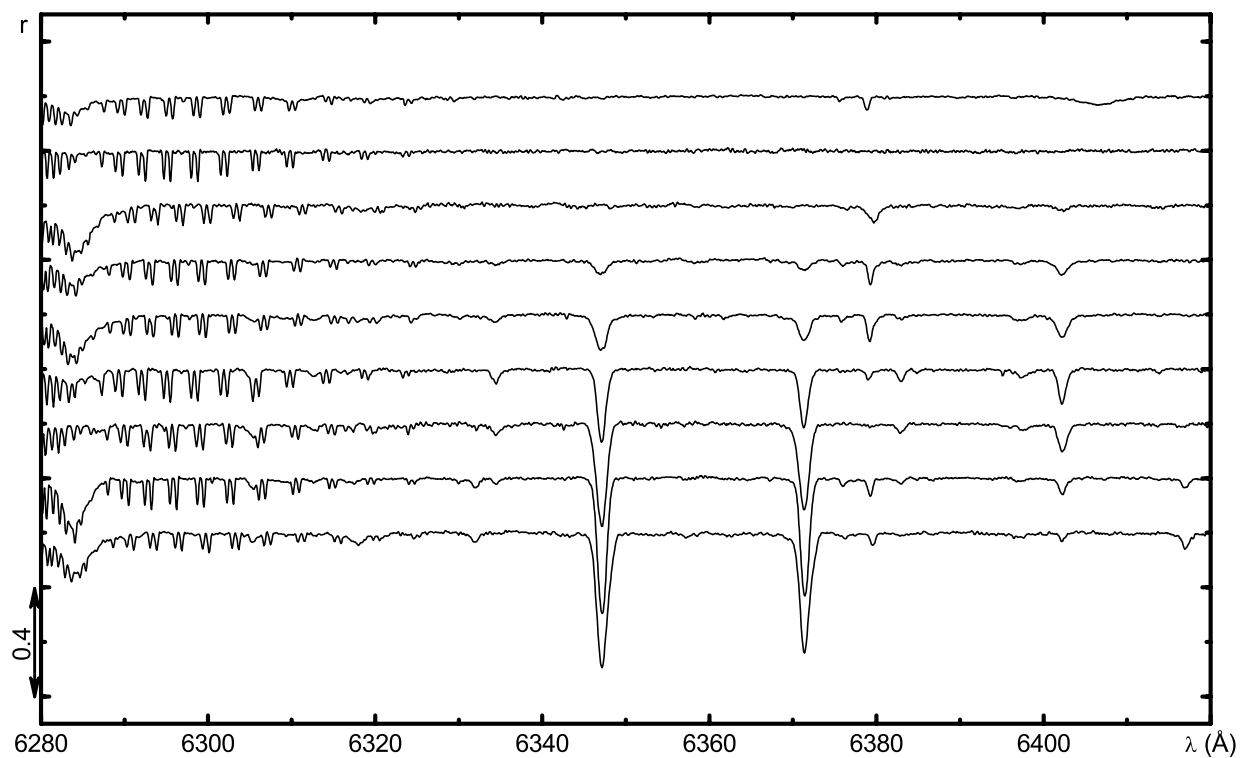
(Продолжение)



(Продолжение)

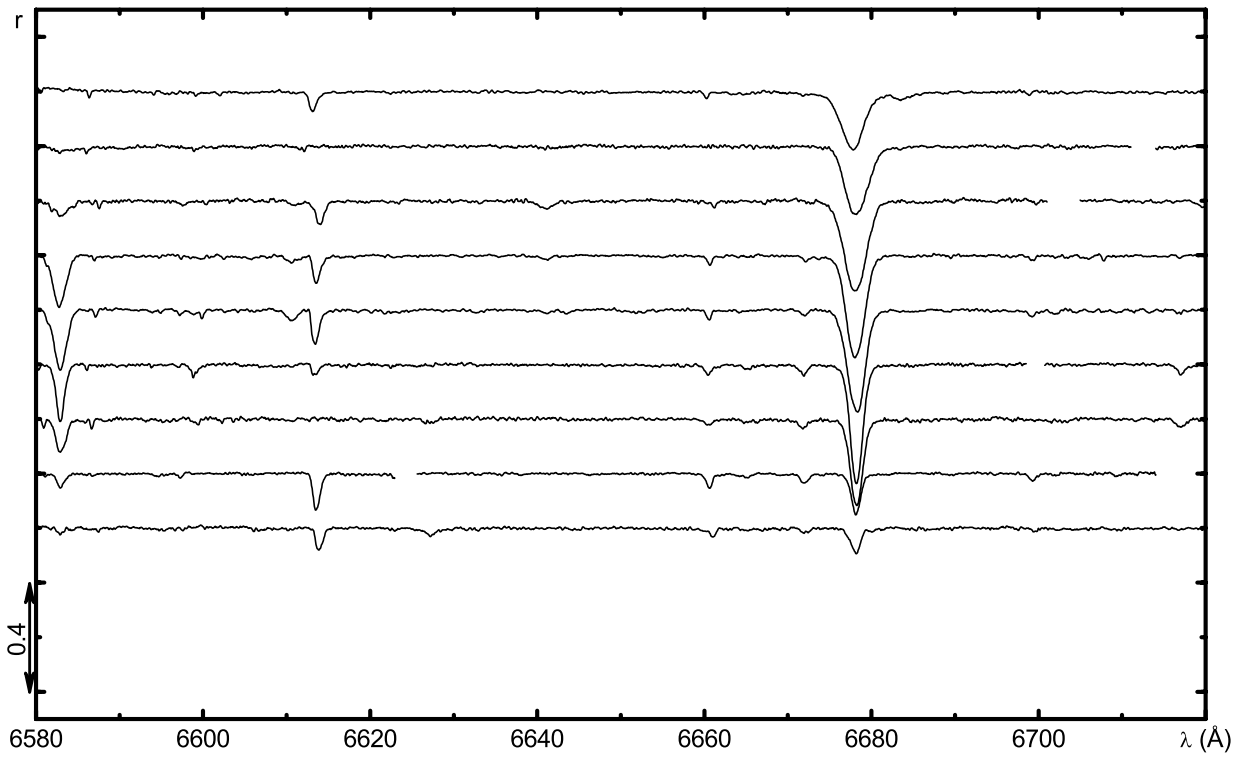
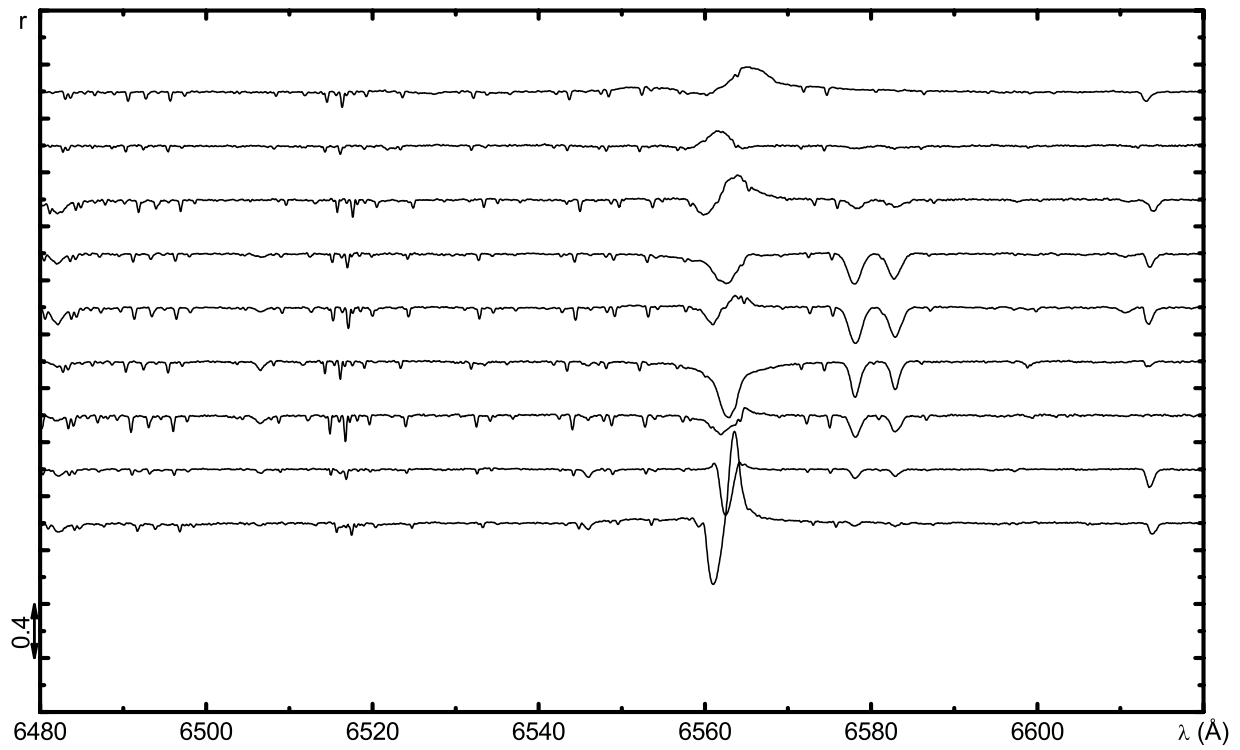


(Продолжение)

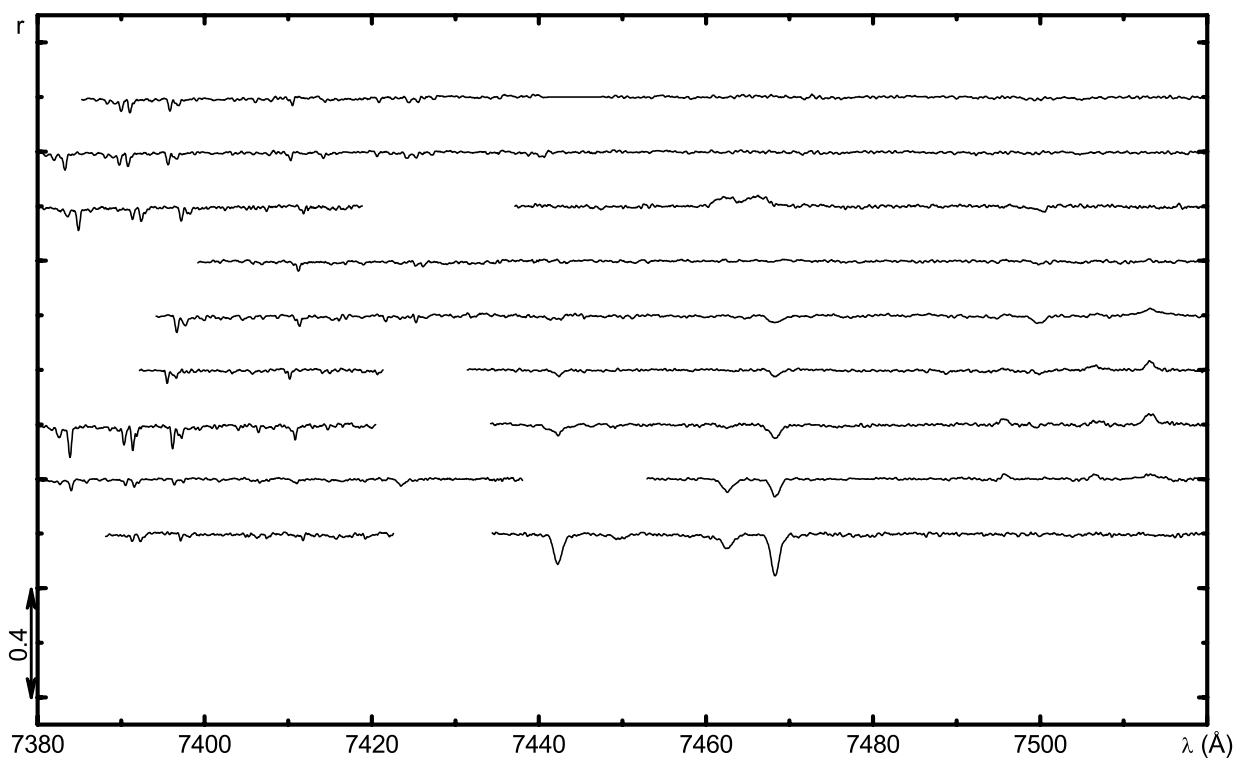
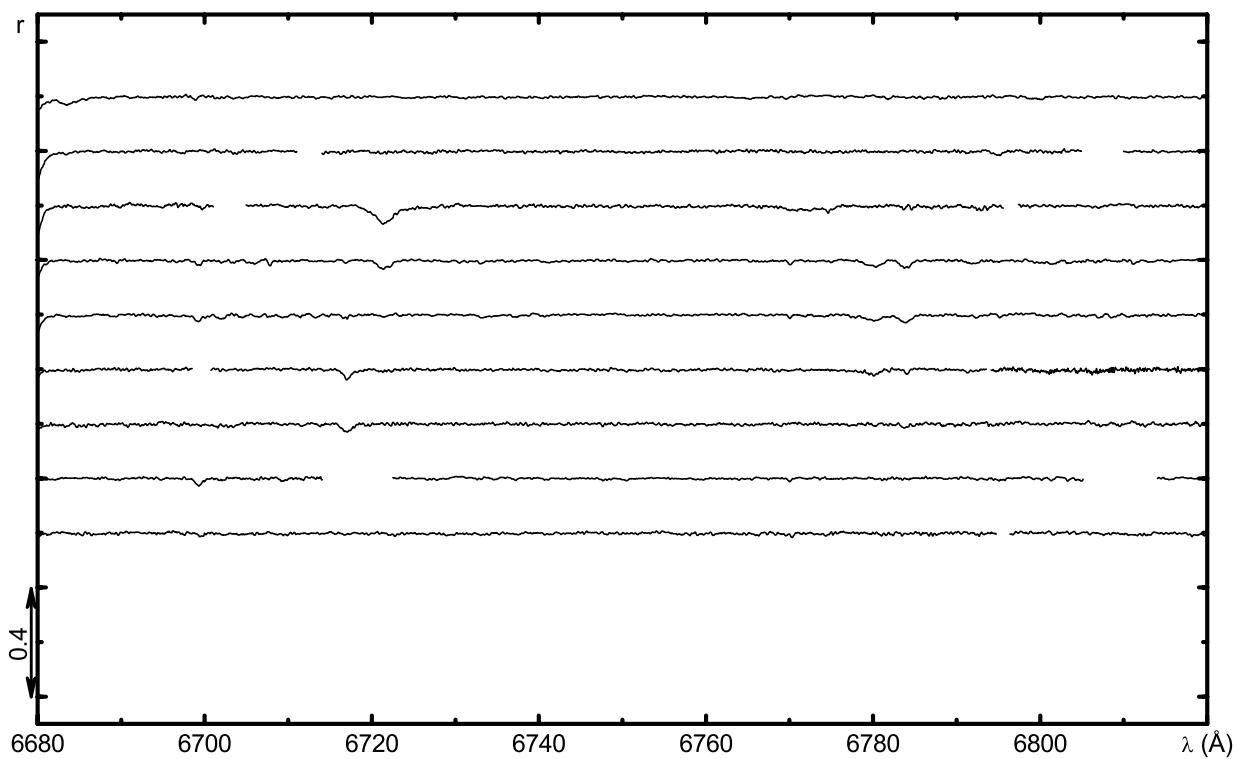


(Продолжение)

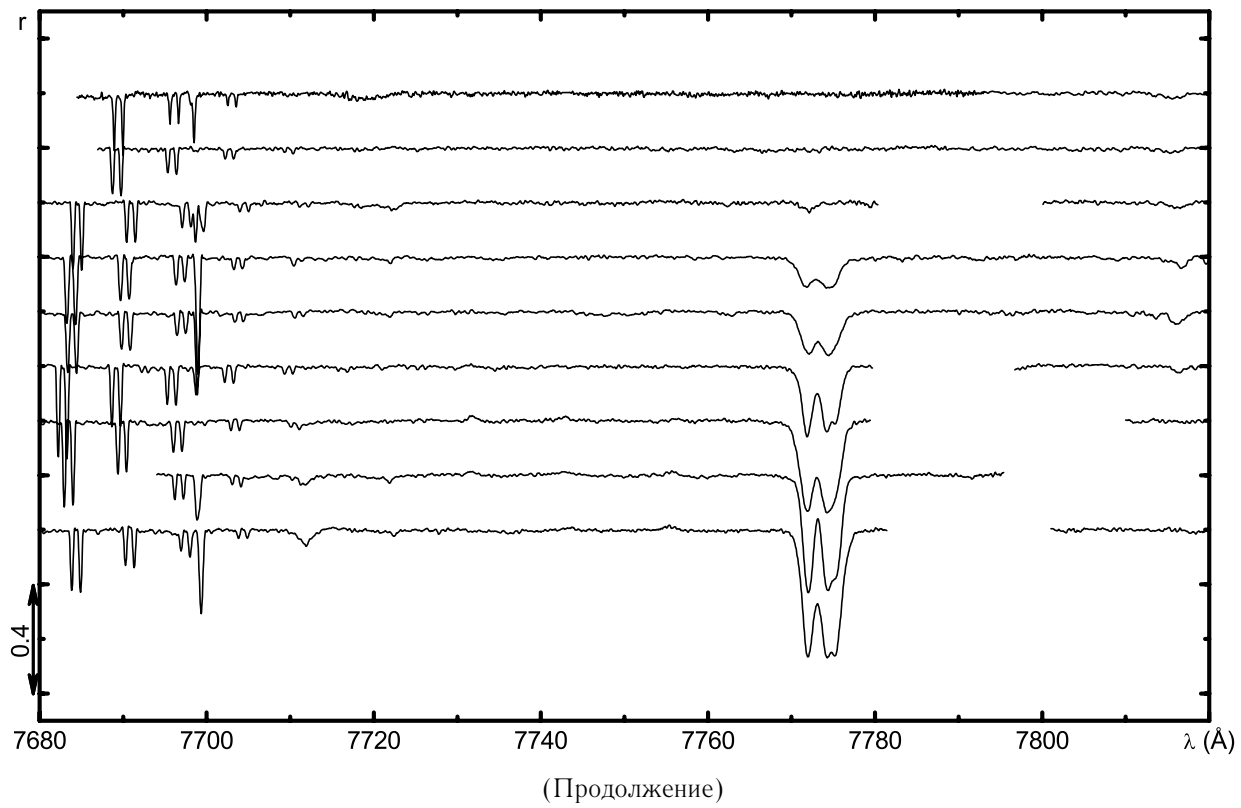




(Продолжение)



(Продолжение)



## БЛАГОДАРНОСТИ

Мы признательны Ф.А.Мусаеву и Г.А.Галазутдинову, получившим наблюдательный материал и предоставившим его нам для обработки.

Работа поддержана программой Отделения Физических наук РАН “Протяженные объекты во Вселенной”, Российским фондом фундаментальных исследований (проект 05-07-90087в) и грантом Американского фонда гражданских исследований (CRDF, грант RUP1-2687-NA-05). Один из авторов (А.С.) благодарен также Польскому комитету научных исследований (грант No. 1 P03D 001 26).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. B. Albayrak, A. F. Gulliver, S. J. Adelman, et al., *Astronom. and Astrophys.* **400**, 1043 (2003).
2. D. J. Lennon, P. L. Dufton, and A. Fitzsimmons, *Astronom. and Astrophys. Suppl. Ser.* **94**, 569 (1992).
3. Ф. А. Мусаев, *Pis'ma Astronom. Zh.* **22**, 795 (1996).
4. Ф. А. Мусаев, Г. А. Галазутдинов, А. В. Сергеев и др., *Кинематика и физика неб. тел* **15**, 3 (1999).
5. Г. А. Галазутдинов, Препринт No. 92 (Нижний Архыз, САО РАН, 1992).
6. Ф. Р. Стриганов, Г. А. Одинцова, *Таблицы спектральных линий атомов и ионов* (Энергоиздат, Москва, 1982).
7. S. Johansson, *Phys. Scripta* **18**, 217 (1978).
8. G. A. Galazutdinov, F. A. Musaev, J. Krelovski, and G. A. H. Walker, *Publ. Astronom. Soc. Pacific* **112**, 648 (2000).
9. A. K. Pierce and J. B. Breckinridge, *Contr. Kitt Peak obs. No. 559* (1973).
10. E. L. Chentsov, F. A. Musaev, and G. A. Galazutdinov, *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **39**, 101 (1996).
11. E. L. Chentsov, S. V. Ermakov, V. G. Klochkova, et al., *Astronom. and Astrophys.* **397**, 1035 (2003).
12. В. Г. Клочкова, Е. Л. Ченцов, Н. С. Таволжанская, Г. А. Проскурова, Препринт No. 183 (Нижний Архыз, САО РАН, 2003).
13. G. Munch, *Astrophys. J.* **125**, 42 (1957).
14. L. M. Hobbs, *Astrophys. J.* **157**, 135 (1969).
15. L. M. Hobbs, *Astrophys. J. Suppl.* **38**, 129 (1978).
16. F. H. Chaffee and R. E. White, *Astrophys. J. Suppl.* **50**, 169 (1982).
17. Л. И. Снежко, Е. Л. Ченцов, *Астрофиз. исслед.* (Изв. САО) **5**, 94 (1973).
18. Е. Л. Ченцов, *Pis'ma Astronom. Zh.* **30**, 368 (2004).
19. D. J. Lennon, P. L. Dufton, and A. Fitzsimmons, *Astronom. and Astrophys. Suppl. Ser.* **97**, 559 (1993).
20. P. Didelon, *Astronom. and Astrophys. Suppl. Ser.* **50**, 199 (1982).
21. R. A. Bartaya, K. B. Chargeishvili, E. L. Chentsov, and Z. U. Shkhagosheva, *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **38**, 103 (1994).
22. Е. Л. Ченцов, Е. С. Горда, *Pis'ma Astronom. Zh.* **30**, 511 (2004).
23. В. Г. Клочкова, Е. Л. Ченцов, *Astronom. Zh.* **81**, 333 (2004).
24. E. L. Chentsov, *Astrophys. and Space Sci.* **232**, 217 (1995).
25. E. L. Chentsov, On the variable winds of BA-supergiants, in *Variable and non-spherical winds in luminous hot stars*, Eds. by B. Wolf, O. Stahl, A. W. Fullerton (Springer, 1999), p.206.

## SPECTRAL ATLAS OF O9.5–A1-TYPE SUPERGIANTS

E. L. Chentsov, A. N. Sarkisyan

High-resolution spectra of nine supergiants and three comparison stars taken with CCD echelle spectrographs in the coudé foci of the 1-m telescope of the Special Astrophysical Observatory of the Russian Academy of Sciences and 2-m telescope of Terskol Observatory (with  $R = 40000$  and  $R = 45000$ , respectively) are reported in a tabular and graphic form. Two hundred ( $\alpha$  Cam, O9.5 Ia) to 1000 (HD 12953, A1 Ia-0) stellar and interstellar lines and bands are identified in the 3600–7800 Å wavelength interval and most of them have their central intensities and heliocentric radial velocities measured. A spectral classification based on weak photospheric absorptions is tested. This is actual for the brightest supergiants and hypergiants, where the formation regions of strong lines, which are traditionally used for classification, also include the bases of stellar winds. Radial gradients of velocity are revealed in the atmospheres of supergiants. The cases of the refinement of the effective wavelengths, analysis of blends, and revealing of wind anomalies in line profiles are illustrated. The atlas is used extensively as a teaching tool.