

АТЛАС СПЕКТРОВ РАННИХ СВЕРХГИГАНТОВ

1. МЕТОДИКА И ЕЕ ПРИЛОЖЕНИЕ К СПЕКТРАМ 8 СВЕРХГИГАНТОВ O9.5—A2.5 В ОБЛАСТИ $\lambda\lambda$ 3819—4927 Å

Е. А. Барсукова, И. А. Лебедева, К. Б. Чаргейшвили, Е. Л. Ченцов*

Описана методика автоматических обмера и редукиции, используемая при обработке спектрограмм, получаемых с помощью Основного звездного спектрографа 6-м телескопа. Графики зависимостей остаточной интенсивности от длины волны в спектральной области $\lambda\lambda$ 3819—4927 Å представлены для α Cam O9.5 Ia, HD 226868 O9.5 Iab, ρ Leo B1 Ib, HD 190603 B1.5 Ia⁺, η CMa B5 Ia, β Ori B8 Ia, HD 21389 A0 Ia, δ Cas A2.5 Ia⁺.

The method is described for the automatic measurement and reduction of the spectrograms, obtained by the main stellar spectrograph of the 6-m telescope. The dependences of the residual intensity upon the wavelength in the spectral region $\lambda\lambda$ 3819—4927 Å are presented for the following stars: α Cam O9.5 Ia, HD 226868 O9.5 Iab, ρ Leo B1 Ib, HD 190603 B1.5 Ia⁺, η CMa B5 Ia, β Ori B8 Ia, HD 21389 A0 Ia, δ Cas A2.5 Ia⁺.

1. Введение. Важнейшими особенностями горячих звезд максимальной светимости являются протяженность и нестационарность их атмосфер. Именно они наиболее активно исследовались в последние годы спектроскопическими методами. Опыт этих исследований выявил недостаточность традиционно получаемых сведений о распределении энергии и интенсивностях линий в спектре звезды. При решении таких задач, как описание поля скоростей в атмосфере, построение ее модели, оценка темпа потери ею вещества, на первый план выдвигаются данные о лучевых скоростях, дифференциальных сдвигах и аномалиях профилей линий. То есть спектроскопическая информация о ранних сверхгигантах должна быть комплексной, позиционно-фотометрической.

Непосредственное выполнение этого требования — одновременное получение точных длин волн и остаточных интенсивностей для одних и тех же точек профиля линии — практикуется еще редко. Чаще ограничиваются получением фотометрических и позиционных параметров линий в целом, причем находятся эти параметры раздельно: первые — с помощью микрофотометров, не обеспечивающих нужной позиционной точности, вторые — с помощью специализированных, обычно осциллоскопических, компараторов. Такая обработка отличается простотой и не нуждается в полной автоматизации. Однако к серьезным ее недостаткам помимо повышенной трудоемкости обмера следует отнести сложность и ненадежность объединения раздельно полученных данных. Кроме того, иногда позиционный обмер становится неточным или даже невозможным без включения в него фотометрирования (примеры такой ситуации: спектральная деталь шире интервала сканирования, она слаба и сильно зашумлена, существенны наклон и кривизна непрерывного спектра).

Применение универсального позиционного прибора типа компаратора-микроденситометра повышает как ценность, так и удобство использования информации, извлекаемой из спектрограммы. Оно предполагает, однако, многократное (до десятков тысяч раз на одну спектрограмму) повторение однотипных операций измерения и редукиции его результатов. Отсюда вытекает: с одной стороны, неизбежность автоматизации обеих процедур, а с другой — жела-

* Абастуманская астрофизическая обсерватория АН ГрузССР.

тельность использования графической формы представления результатов обработки.

2. Назначение атласа. В свете отмеченных выше особенностей спектроскопии ранних сверхгигантов из редуцированных операций наиболее важными оказываются те, что составляют, вообще говоря, лишь предварительный этап обработки спектрограммы. Имеется в виду снятие нелинейностей, фиксируемых характеристической и дисперсионной кривыми, а также кривой непрерывного спектра, и получение остаточной интенсивности r как функции длины волны λ . Достаточно большой набор графиков зависимостей $r(\lambda)$, даже не подвергнутых какой-либо ректификации, иными словами, атлас спектров стандартных и исследуемых объектов, позволяет решать следующие задачи.

1. Отождествление спектральных деталей. Атлас может послужить полезным графическим дополнением к монографии Меррилла [1]. Правильный подбор масштабов по обеим осям, закрепление их в качестве стандартных и удобное взаимное расположение спектров звезд различных спектральных классов облегчают сопоставление некоторой детали в спектрах исследуемой и опорных звезд. При этом могут использоваться критерии близости как длин волн, так и относительных интенсивностей линий в группах, таких, в частности, как мультиплеты и бленды. Выявление последних упрощается возможностью учета их ширин. Правильность отождествления контролируется по изменению интенсивностей линий с температурой или светимостью. Повышению надежности и оперативности отождествления должно способствовать включение в атлас отдельных звезд главной последовательности с узкими линиями в спектрах и объектов с необычными спектрами, таких, например, как ν Sgr или PCyg.

2. Выявление признаков нестационарности атмосфер ранних сверхгигантов. Атлас может рассматриваться в качестве графического аналога описательных обзоров и каталогов Розендаля [2], Ченцова [3] и др. Применительно к заатмосферно-ультрафиолетовой спектральной области, освоенной лишь в самое последнее время, графическая форма представления информации уже стала традиционной. В каталоге Сноу и Дженкинса [4], например, она успешно сочетается с другими формами — фотографической и таблично-цифровой.

Поскольку, с одной стороны, интересующие нас деформации профилей линий и их сдвиги по оси λ , как правило, невелики, требования к точности графиков оказываются весьма высокими. Но, с другой стороны, линии в спектрах ранних сверхгигантов достаточно широки, чтобы отношение сигнал—шум могло быть повышено даже за счет некоторого снижения спектрального разрешения.

Рассматриваемая задача предполагает сличение спектров как различных объектов, так и одного и того же объекта в разные моменты. В первом случае важна возможность приведения к единому масштабу атласа спектров, которые сфотографированы с разными выдержками и с помощью спектрографов, обладающих различными кривыми реакции и дисперсиями; во втором — отмеченное выше упрощение и ограничение числа редуцированных процедур, повышающее оперативность регистрации изменений в спектрах исследуемых объектов и тем самым открывающее возможность корректировки текущих наблюдательных программ.

3. Контроль за качеством наблюдательного материала. Работа над атласом является естественным и эффективным средством контроля и стимулом усовершенствования по отношению к тому приборно-методическому комплексу, с помощью которого атлас регулярно пополняется спектрами.

Приобщение к атласу результата обработки каждой вновь полученной спектрограммы выявляет заодно с реальными также и те аномалии спектра, которые вызываются нестабильностью приборов и нарушением стандартного режима их эксплуатации. Таким путем фиксируются температурные градиенты в спектрографе, неточности выставления решетки, загрязнение оптики (в первую очередь полеспрямляющей линзы, располагающейся в непосредственной близости к фотоэмульсии), небрежности, допускаемые при лабораторной калибровке и проявлении пластинок и т. п. Перспектива облегчения процедур сравнения и объединения графиков должна побудить наблюдателя к снижению изменений

плотности от пластинки к пластинке и на каждой из них — от одного участка спектра к другому, в частности за счет более тщательных калибровки фотоэкспонетра и подбора сочетаний фильтров, решеток и эмульсий. Максимальное уширение полосы спектра звезды на пластинке, отработка системы длин волн спектра сравнения и создание его атласов — все это приобретает дополнительную актуальность, поскольку оказывается резервами сокращения времени и повышения точности построения кривых $r(\lambda)$.

3. Объекты, наблюдательный материал и его обработка. В настоящей публикации представлена первая часть атласа, включающая кривые $r(\lambda)$ в ограниченной спектральной области для 8 объектов, перечисленных в таблице.

Звезда	Sp	M_{bol}	Списки линий	Линии, помеченные в атласе символами	
				●	○
1	2	3	4	5	6
α Cam	O9.5 Ia	—9 ^m 8	—	He II	Si IV
HDE 226868 *	O9.7 Iab	—9.5	[5]	N III	—
ρ Leo	B1 Ib	—8.3	[6]	O II	Si III
HD 190603	B1.5 Ia ⁺	—9.7	—	N II	—
γ C Ma	B5 Ia	—8.2	[7]	He I	—
β Ori	B8 Ia	—8.1	[8]	C II	—
HD 21389	A0 Ia	—7.3	—	Si II	—
δ Cas	A2.5 Ia ⁺	—8.8	[9]	Fe II	—

* Приводимый в атласе спектр соответствует фазе 0.87, отсчитанной от верхнего соединения HDE 226868 — оптического компонента рентгеновского источника Cyg X-4.

Общее количество использованных спектрограмм — 23. Необходимо подчеркнуть, что все они не предназначались для изготовления атласа, а были получены в ходе выполнения наблюдательных программ 1976—1978 гг. по темам: «Нестационарные атмосферы ранних сверхгигантов» и «Оптические компоненты рентгеновских источников».

Для получения спектрограмм использован Основной звездный спектрограф 6-м телескопа. Решетка 600 штр/мм с углом блеска около 25° и камера Шмидта с полеспрямляющей линзой и фокусным расстоянием 600 мм позволили сфотографировать на пластинках Kodak IIaO или 103aO спектры указанных выше объектов в диапазоне от 3819 до 4927 Å с дисперсией, близкой к 9 Å/мм. Щель спектрографа раскрывалась настолько, чтобы предел спектрального разрешения не превысил 0.5 Å для HDE 226868 и 0.3 Å для остальных звезд. Изображения звездных спектров на пластинках расширены до 0.6 мм. В качестве источников спектра сравнения использовались лампы с полым катодом из железа, заполненные неоном и аргоном. Фотометрическая калибровка выполнялась с помощью лабораторного спектросенситометра ИСП-73. Проявление пластинок велось при 20° С в течение 9 мин в проявителе MWP-2.

Для автоматической обработки полученных спектрограмм использован комплекс программ, созданный в отделе внегалактической и релятивистской астрофизики САО АН СССР [10—12]. По сравнению с другими имевшимися в нашем распоряжении программами этот комплекс предоставляет более широкие возможности, более удобен в эксплуатации и требует меньших затрат машинного времени.

В процессе обработки можно выделить 4 этапа.

1. Информация о спектре звезды с помощью микрофотометра с аналого-цифровым преобразователем «спектр—код» [13] считывается с шагом 0.01 мм и переносится на перфоленту. Винт микрофотометра обеспечивает непрерывный обмер не более 25 мм пластинки, так что на одну спектрограмму приходится 6 независимых записей-массивов пропусканий. Каждый из них дополняется списком положений избранных линий спектра сравнения, измеренных с помощью ходового винта при совмещении изображения некоторой линии на экране микрофотометра с измерительной щелью. Кроме того, измеряются про-

пускания полей калибровочной шкалки, необходимые для построения характеристических кривых.

2. Информация, состоящая из массивов пропусаний спектра звезды и таблиц дисперсионных и характеристических кривых, готовится к вводу в ЭВМ.

3. Перевод пропусаний в остаточные интенсивности, а положений — в длины волн и построение графиков $r(\lambda)$ осуществляется с помощью ЭВМ «М-222». Проведение непрерывного спектра производится автоматически, по алгоритму, описанному в [12], в режиме, подобранном предварительно и приемлемом для редукции спектральных классов O9—A3. Ошибки ре-

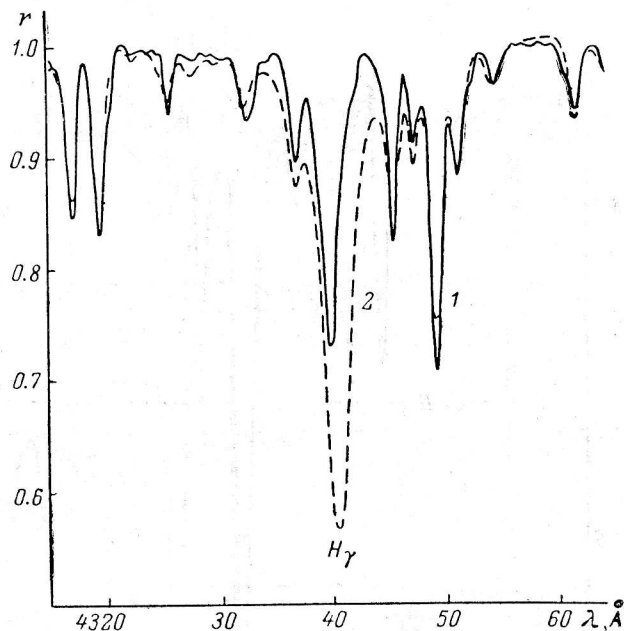


Рис. 1. Сопоставление профилей линий в области H_{γ} HD 190603 V1.5 Ia⁺ (1) и ρ Leo V1 Ib (2). При совмещении соседних линий H_{γ} в спектре первого объекта оказывается сдвинутой на -0.8 \AA или на -55 км/с .

дукции не превышают $\pm 0.1 \text{ \AA}$ по оси λ и ± 0.005 по оси r , завышение или занижение непрерывного спектра не превышает ± 0.03 .

При ограниченном числе процедур и указанном уровне погрешностей оказалось возможным отказаться от диалогового режима работы с ЭВМ и тем самым заметно снизить затраты машинного времени — наиболее дефицитной составляющей времени обработки спектрограмм.

4. Проводится визуальный контроль полученных графиков и их исправление. Последнее ограничивается выявлением и устранением ложных спектральных деталей, обусловленных дефектами пластинки и загрязнением полеспрямляющей лин-

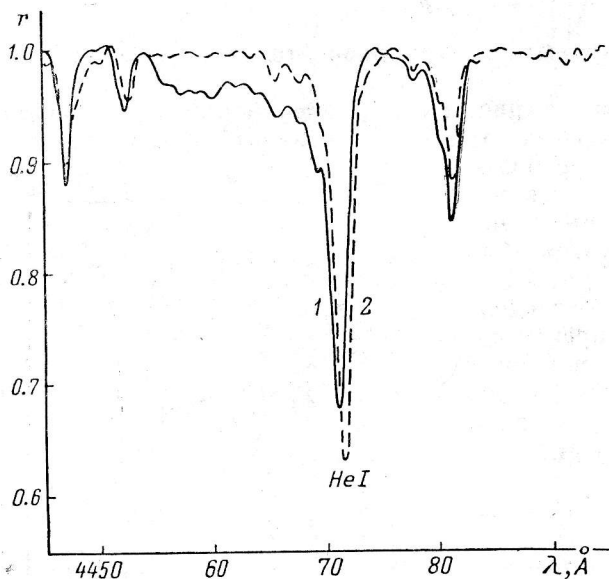
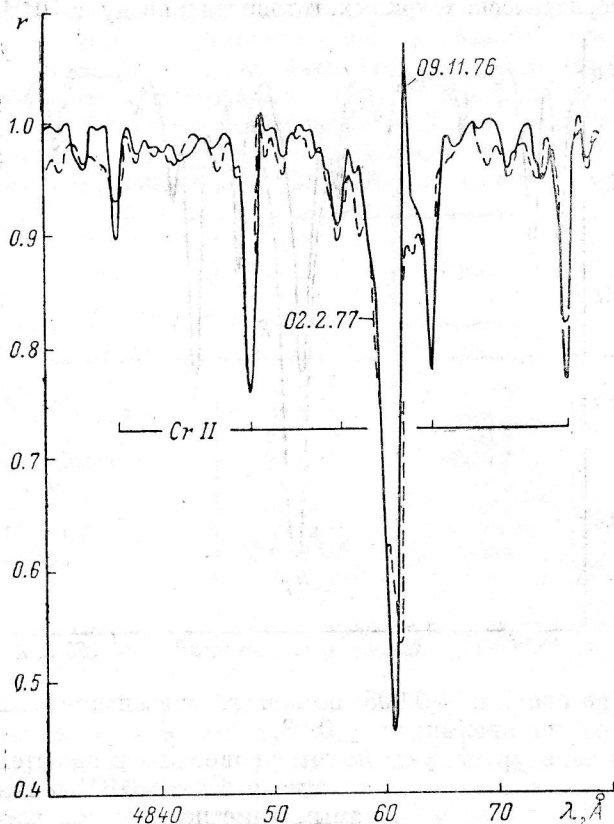


Рис. 2. То же, что на рис. 1, для области линии He I $\lambda 4471 \text{ \AA}$. Сдвиг ядра составляет -0.25 \AA или -17 км/с , синее крыло заметно усилено.

зы, а также небольших систематических смещений отдельных участков кривых по горизонтали (сбой преобразователя «спектр—код», недостаток опорных линий) или вертикали (вариации уровня непрерывного спектра, возникшие при его автоматическом воспроизведении).

На полную обработку одной спектрограммы затрачивается 6—8 ч. Почти половина этого времени уходит на производимые вручную операции измерения положений и прозрачностей и исправления графиков, на работу с ЭВМ — 2.5 ч.

4. Возможности атласа. Кривые $r(\lambda)$ воспроизведены на с. 39—47 в масштабе 1 мм — 0.01 по оси r и 1 Å по оси λ . Они размещены одна под другой со сдвигом по оси r на 0.2, в том же порядке, что и соответствующие им объекты в таблице. По оси λ указаны лишь длины волн, кратные 50 Å. Списки линий, отождествленных в охваченной атласом спектральной области, можно найти в работах, указанных в колонке 4 таблицы. Линии отдельных элементов в некоторых стадиях ионизации помечены снизу точками и кружками (см. таблицу, колонки 5 и 6 соответственно). В каждом случае из имеющихся выбирался тот объект, в спектре которого данный набор линий виден наиболее отчетливо.



Для получения каждого из графиков использовано по 2—3 спектрограммы. Ввиду большой неоднородности наблюдательного материала све-

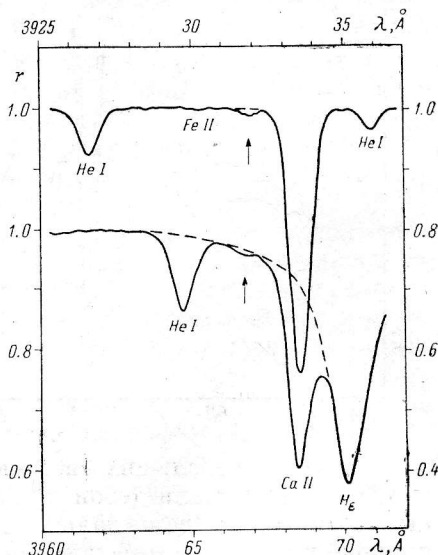
Рис. 3. Временные изменения профиля линии H_β в спектре 6 Cas A2.5 Ia⁺.

дение нескольких исходных кривых в одну окончательную производилось обычно вручную.

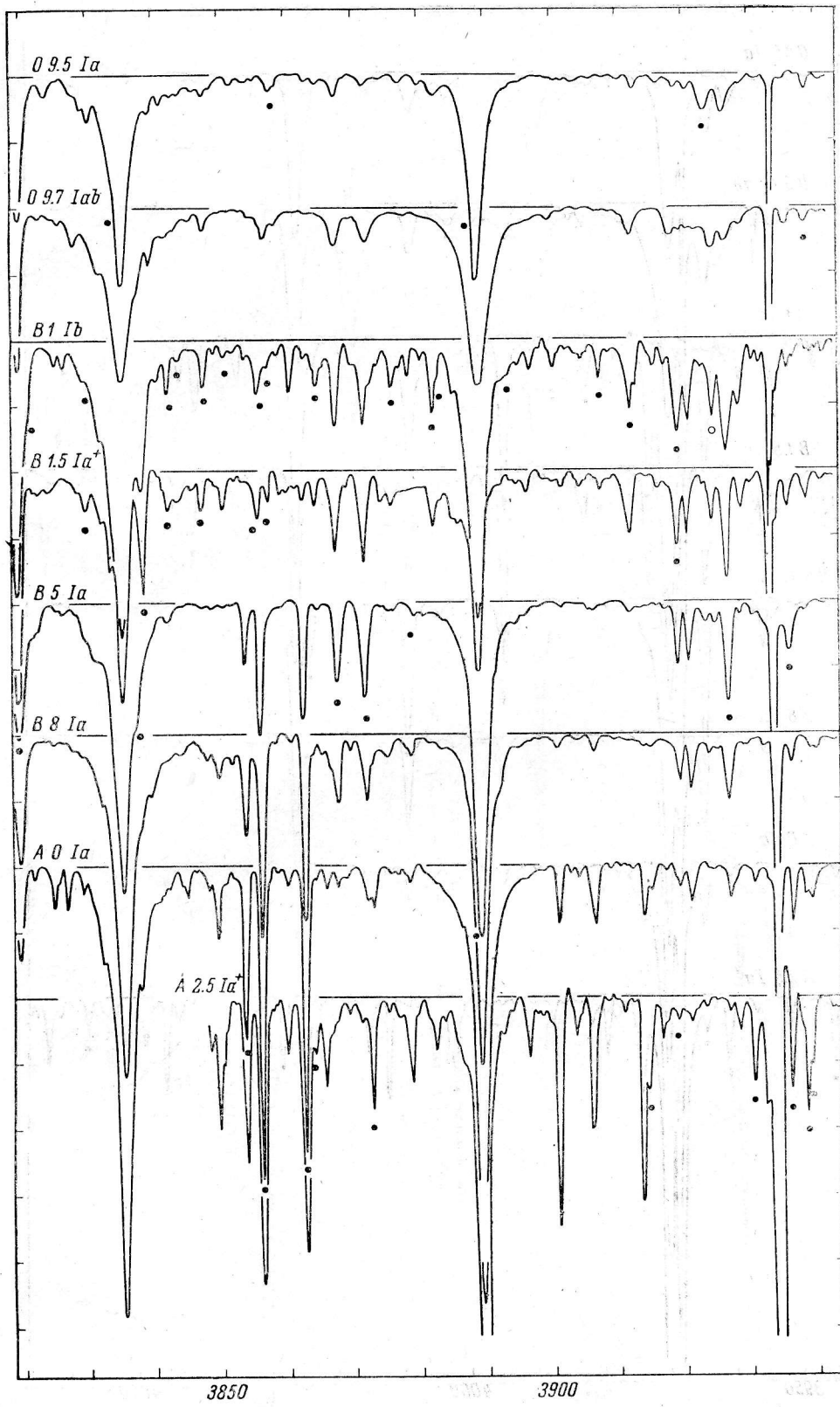
Для оценки остаточных фотометрических искажений кривых $r(\lambda)$ были привлечены определения центральных глубин и эквивалентных ширин абсорбций в спектрах ρ Leo, β Ori и 6 Cas, содержащиеся в [6, 8] и [9] соответственно. Систематические ошибки оказались заключенными в пределах $\pm 12\%$ для центральных глубин и от -10 до $+20\%$ для эквивалентных ширин. Последние цифры отражают некоторое уширение линий в атласе, происходящее при ручном усреднении кривых. Остаточные искусственные дифференциальные сдвиги линий не превышают ± 0.2 Å или ± 15 км/с.

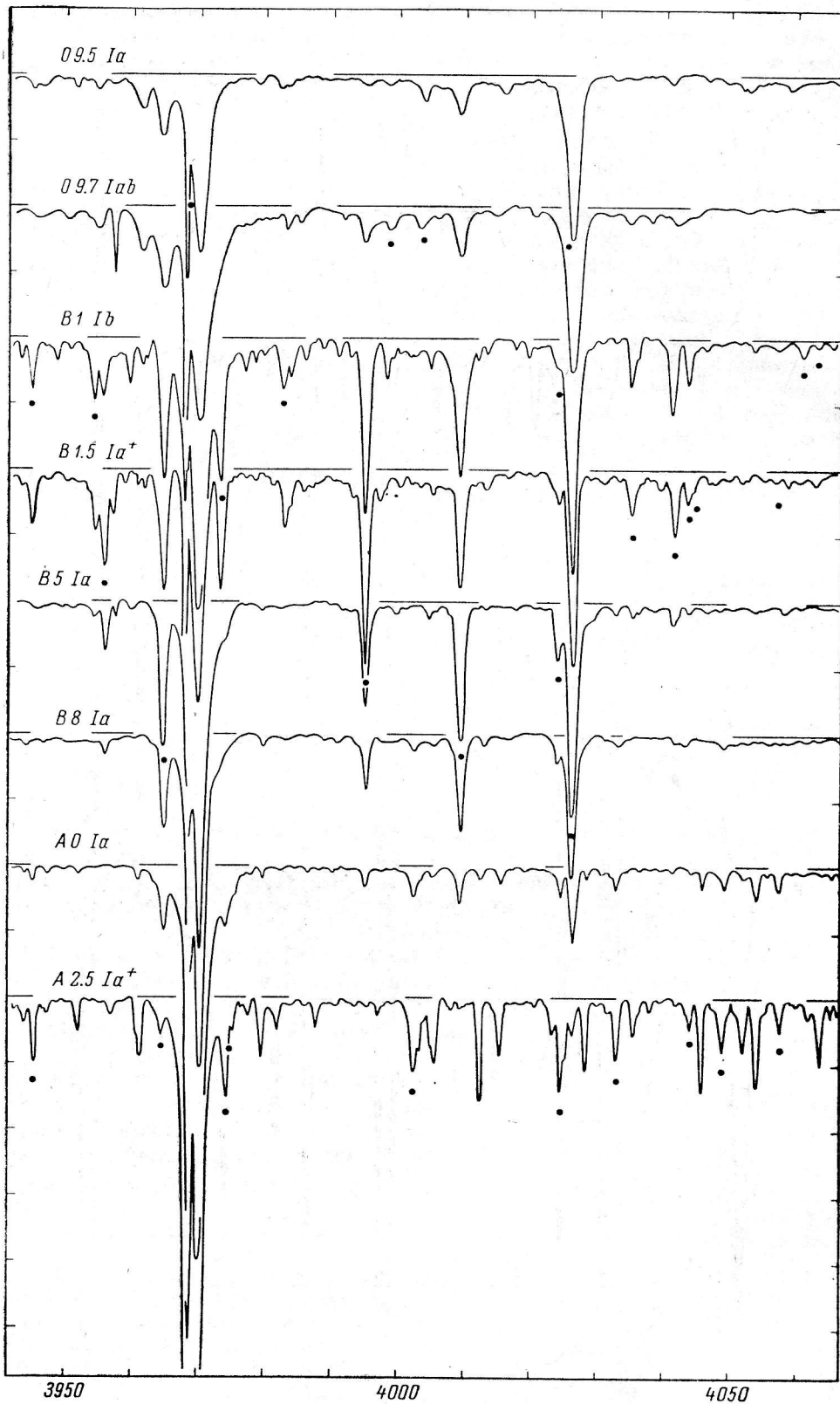
Рис. 4. Участки спектра β Ori B8 Ia в области линий K и H Ca II 08.09.78. (Результат автоматического сложения восьми спектров.)

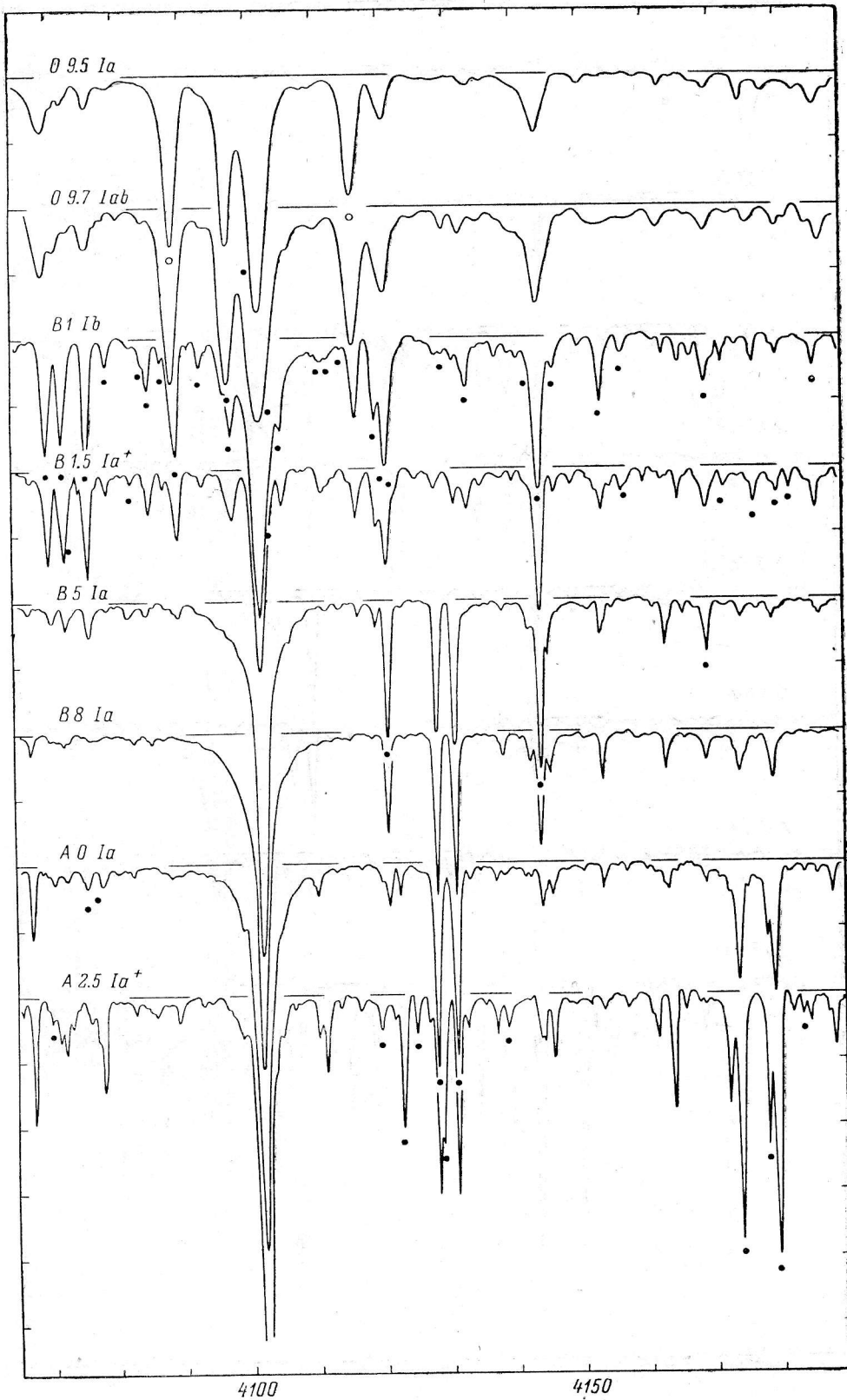
Штрихами показаны синие крылья линий K и H_ϵ , воспроизведенные симметрично красным, стрелками — обло-лочечные компоненты линий Ca II.

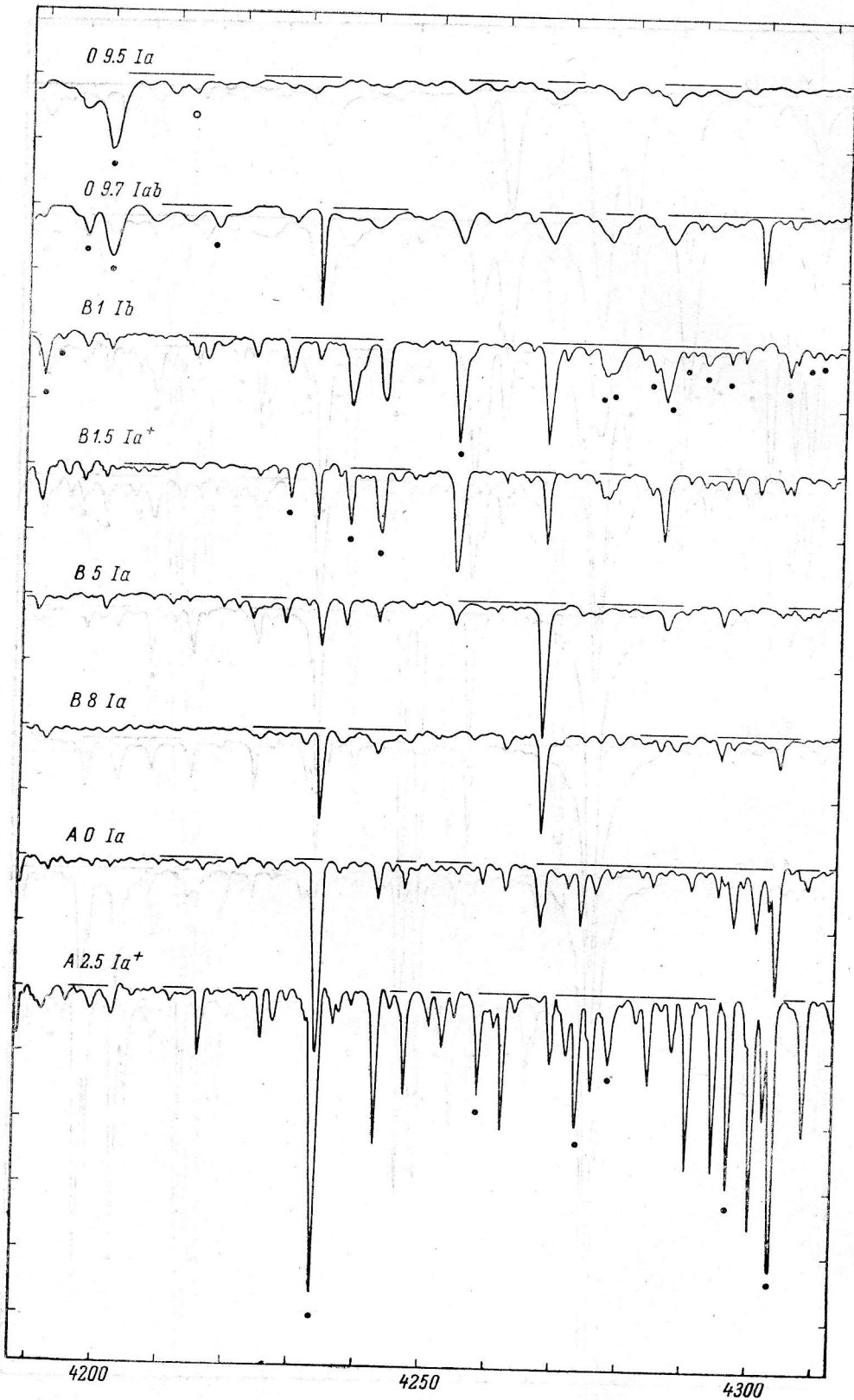


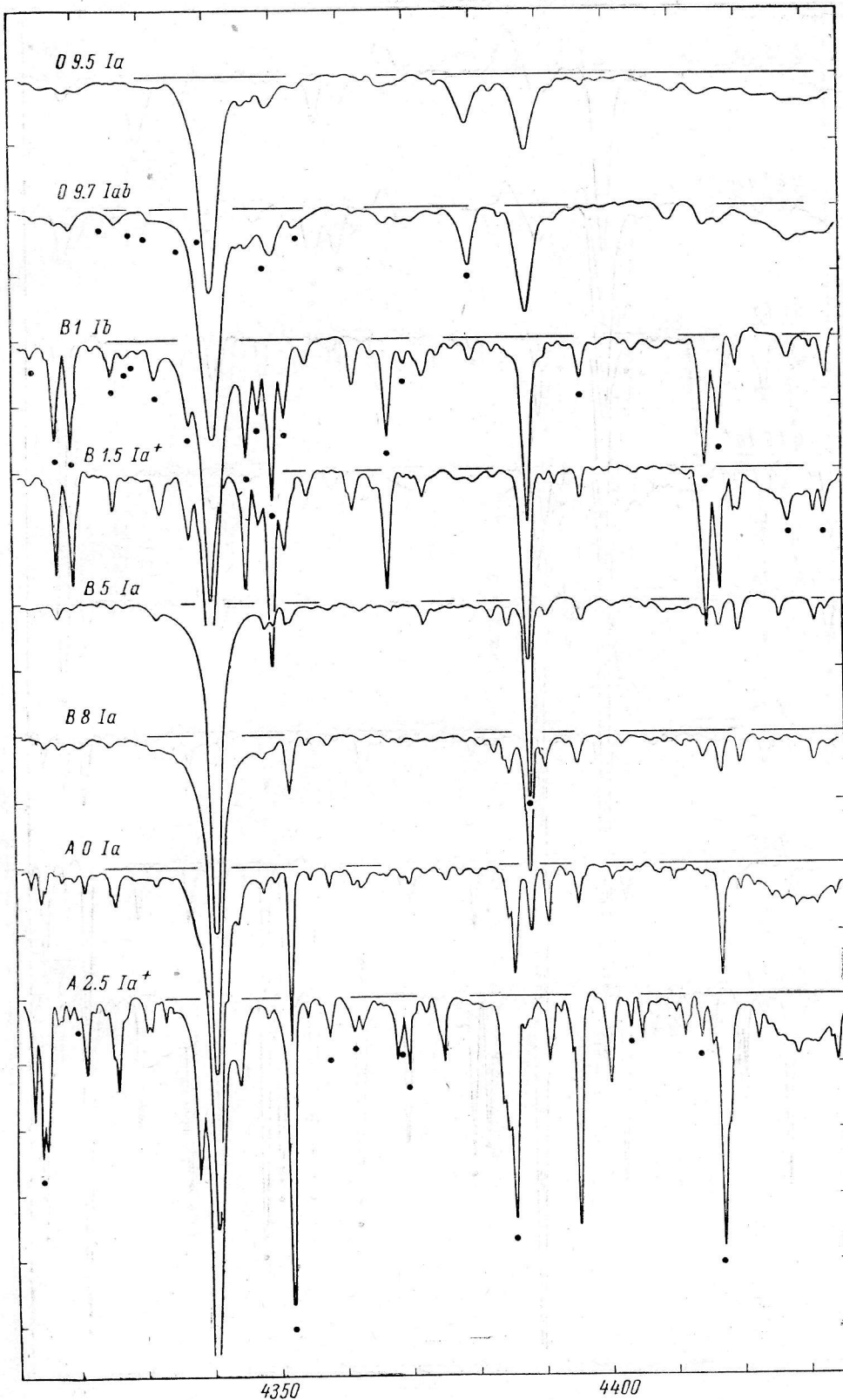
Эквивалентные ширины линий, еще различимых в атласе, близки к 10 мÅ. Заметны изменения профилей, сопутствующие даже небольшим изменениям спектрального класса и светимости. Так, на фоне усиления водородных линий

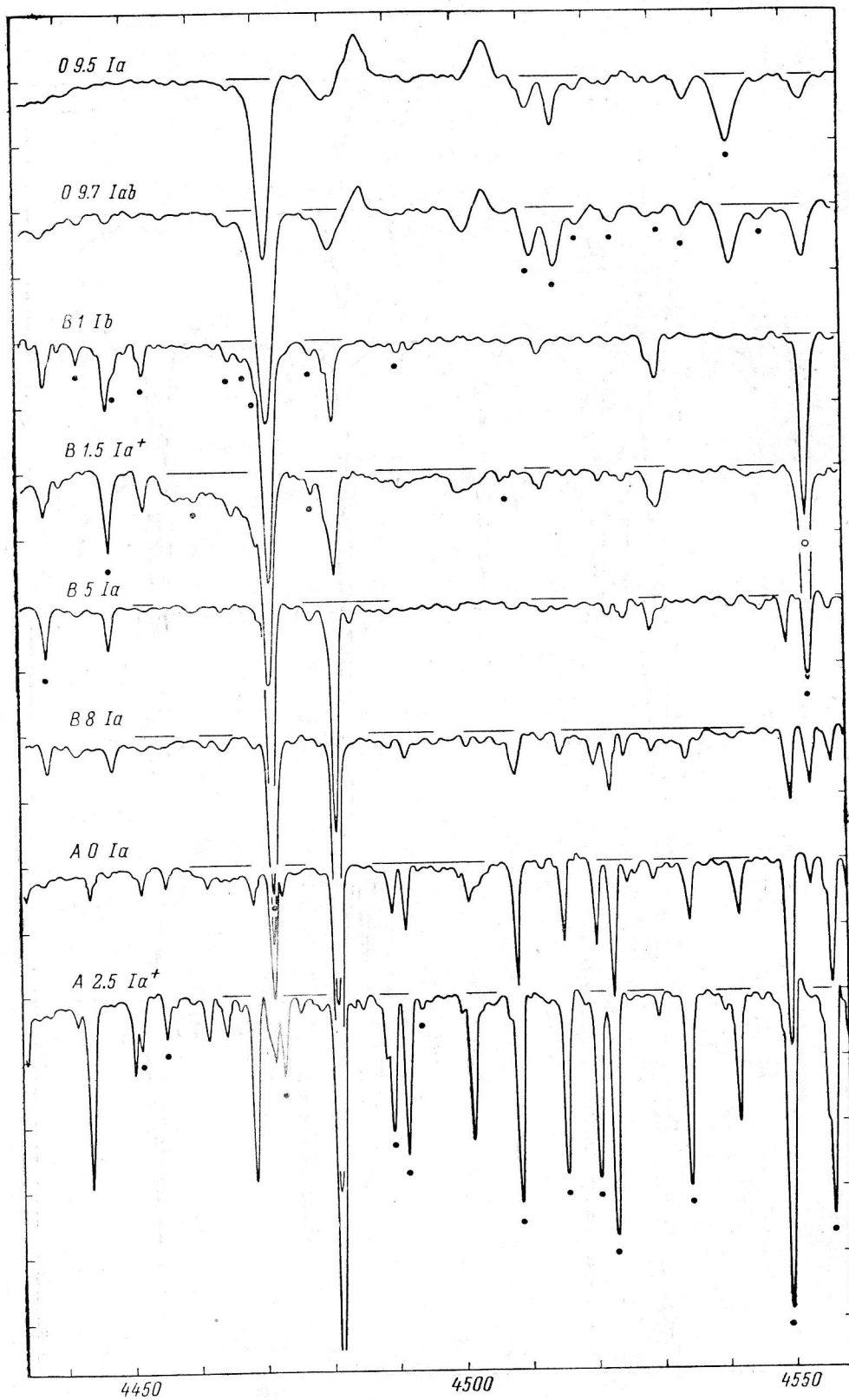


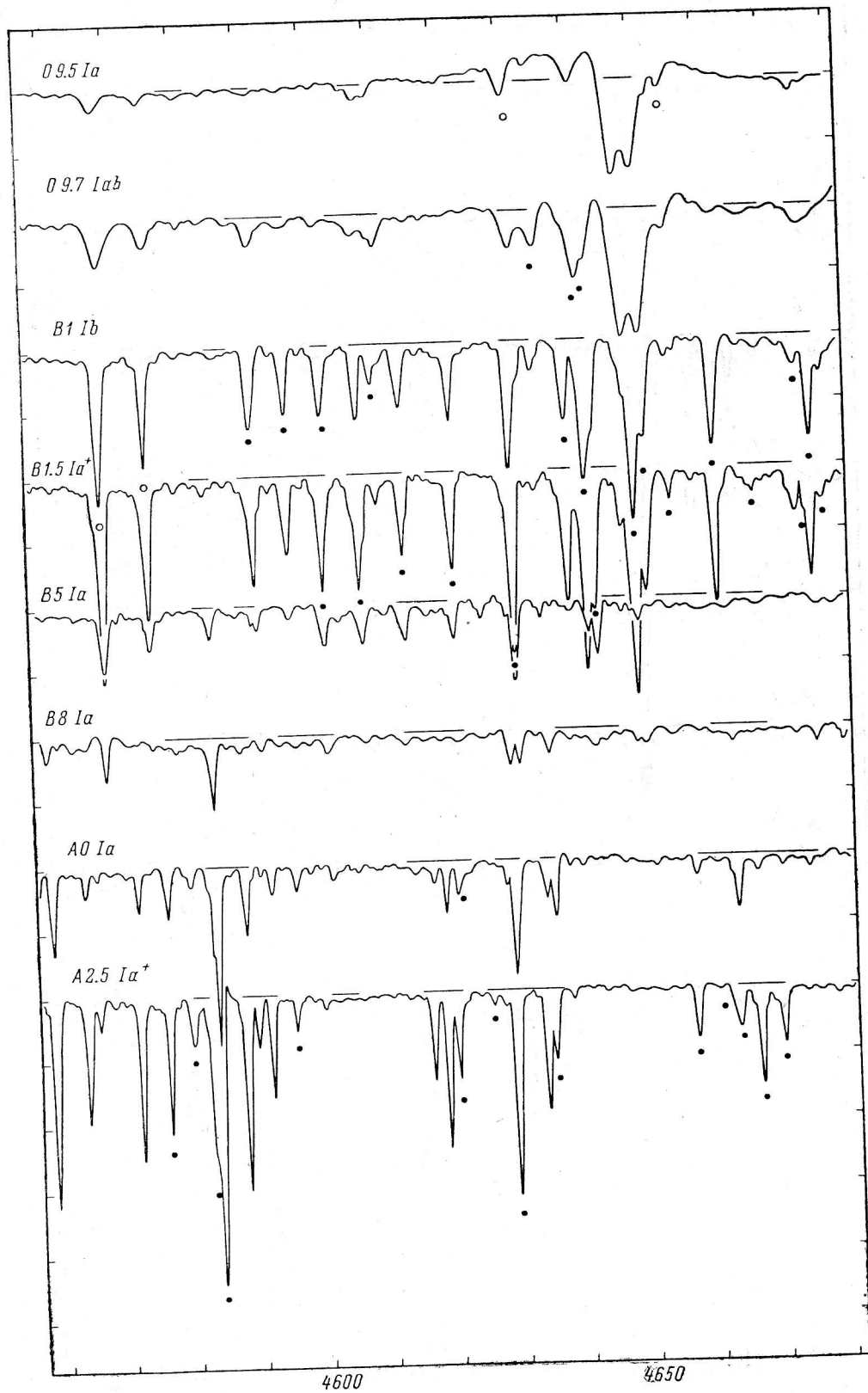


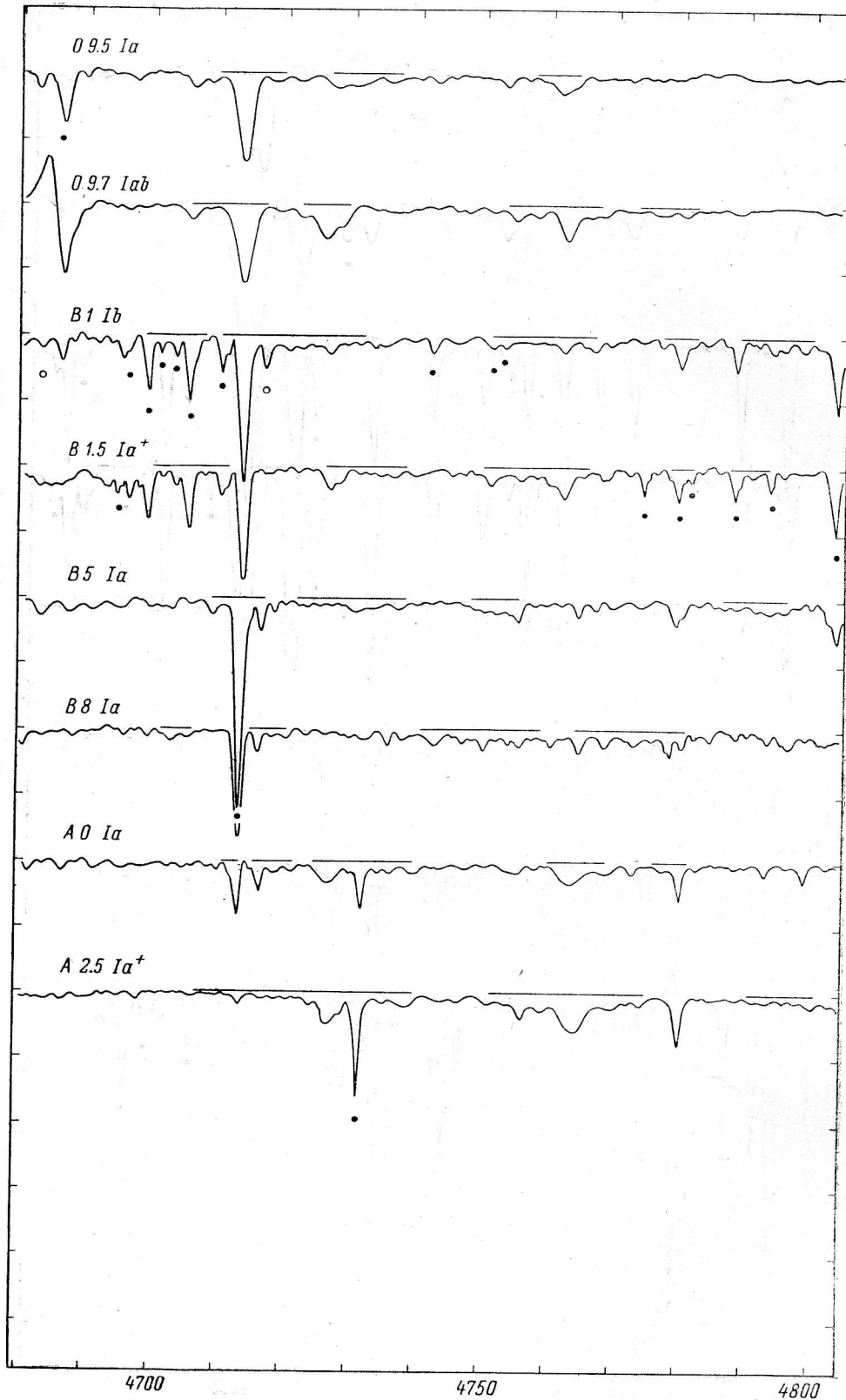


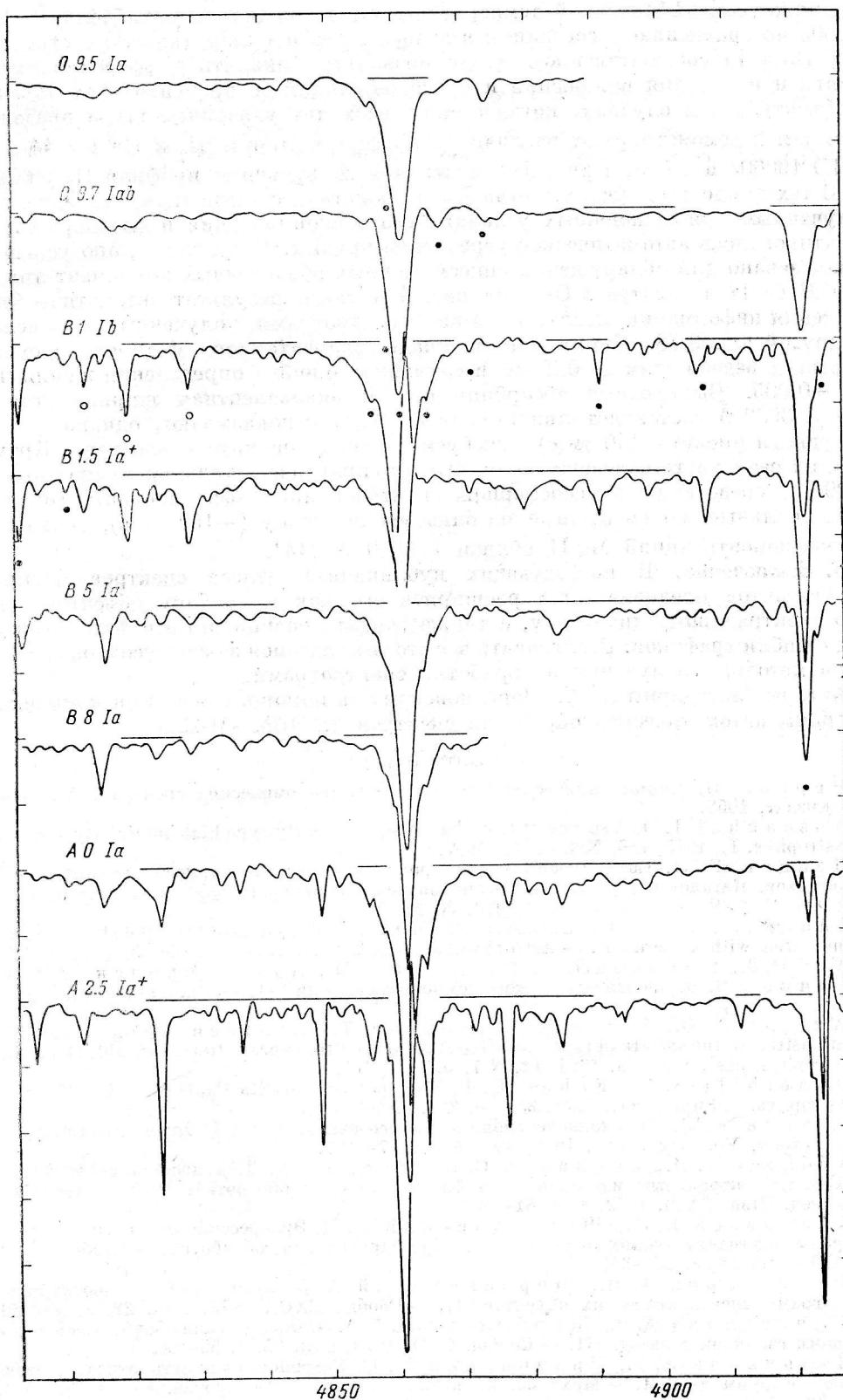












с понижением эффективной температуры звезды видно их ослабление у HD 190603 по сравнению с соседними в атласе ρ Leo и η CMa (классы светимости Ia⁺, Ib и Ia соответственно). Атлас позволяет выявлять дифференциальные сдвиги и изменения положений и профилей линий со временем и от объекта к объекту в тех случаях, когда они превосходят указанные выше пределы. Рис. 1 и 2 демонстрируют различия в профилях линий H γ и He I λ 4471 Å у HD 190603 и ρ Leo, а рис. 3 — изменения со временем профиля H β у β Cas.

В тех немногих случаях, когда мы располагали спектральным материалом, полученным при неизменных условиях его экспонирования и фотообработки, практиковалось автоматическое усреднение кривых. В частности, оно успешно использовано для обнаружения синесмещенных оболочечных компонент линий K и H Ca II в спектре β Ori. На рис. 4 показан результат автоматического сложения информации, извлеченной из 8 спектрограмм, полученных одна вслед за другой 08.09.78. Суммарная площадь элементарного фотометрируемого участка доведена этим до 0.2 мм² и случайная ошибка определения r снижена до ± 0.005 . Выявленные абсорбции слабы: эквивалентная ширина детали с $\lambda \approx 3932$ Å составляет лишь около 8 мÅ. Они показывают, однако, близкие сдвиги (около -140 км/с) и требуемое отношение интенсивностей. Кроме того, их реальность подтверждается тем, что практически одновременно с ними, 05.09.78, средствами заатмосферной спектроскопии зафиксированы гораздо более сильные, но смещенные на близкую величину (-150 км/с), оболочечные компоненты линий Mg II вблизи λ 2800 Å [14].

5. Заключение. В последующих публикациях атласа спектров ранних сверхгигантов предполагается расширить его как по набору объектов, так и по спектральному диапазону, а также снизить позиционные и фотометрические ошибки графиков. Реализовать все это мы надеемся за счет усовершенствования методики получения и обработки спектрограмм.

Авторы благодарны А. Л. Щербановскому за помощь в освоении комплекса программ автоматической обработки спектров на ЭВМ «М-222».

Литература

1. Меррилл П. Линии химических элементов в астрономических спектрах. М., Гостехиздат, 1958.
2. Rosendhal J. D. A survey of H-alpha emission in early-type high-luminosity stars. — *Astrophys. J.*, 1973, 186, N 3, p. 909—937.
3. Ченцов Е. Л. Спектроскопические проявления нестационарности ранних сверхгигантов. Каталог параметров и признаков нестационарности для сверхгигантов O, B и A с $V < 6^m$. — *Сообщ. САО*, 1978, № 21. 78 с.
4. Snow T. P., Jenkins E. B. A catalog of 0.2 Å resolution far-ultraviolet stellar spectra measured with Copernicus. — *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, 1977, 33, No. 3, p. 269—360.
5. Абаб О. Э., Бычкова Л. В., Копылов И. М., Кумайгородская Р. Н., Ченцов Е. Л. Спектр оптического компонента Лебеда X-1. — *Настоящий сб.*, с. 3—11.
6. Wright K. O., Lee E. K., Jacobson T. V., Greenstein J. L. Line Intensities in the spectra of representative stars of spectral types B to G. — *Publ. Dominion astrophys. obs.*, Victoria, 1964. 12, N 7, p. 173—291.
7. Underhill A. B., Fahey R. P. The spectrum of Eta Canis Majoris, B5 Ia. — *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, 1973, 25, No. 224, p. 463—486.
8. Ченцов Е. Л. Высокоскоростной спектр сверхгиганта β Ориона. — *Сб. работ по астрон.* Уральск. ун-та, 1969, вып. 4, с. 177—197.
9. Аббасов Г. И., Зейналов С. К., Ченцов Е. Л. Атмосфера сверхгиганта β Cas. I. Спектральный материал и его фотометрическая обработка. 1972. — *Астрофиз. исслед.* (Изв. САО), 1972, 4, с. 81—90.
10. Афанасьев В. Л., Щербановский А. Л. Экспрессная обработка спектрограмм внегалактических объектов. I. Предварительная обработка. — *Сообщ. САО*, 1976, вып. 16, с. 25—34.
11. Шаповалова А. И., Щербановский А. Л. Экспрессная обработка спектрограмм внегалактических объектов. II. — *Сообщ. САО.*, 1978, вып. 22, с. 49—60.
12. Шаповалова А. И., Щербановский А. Л. Экспрессная обработка спектрограмм галактик и звезд. III. — *Сообщ. САО*, 1979, вып. 25, с. 55—66.
13. Мельников А. Г., Грановский М. П. Устройство для автоматизации ввода спектрограмм в ЭВМ. — *Механиз. и автоматиз. упр.* Науч.-произв. сб., 1973, № 1, с. 78—80.
14. Bates V., Giavetta D. L., Brown-Kerr W. IUE observations of high-velocity components in spectra of β Orionis. — *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 1981, 195, No. 1, p. 9—13.