УДК 520.35

Спектральный комплекс фокуса Нэсмита 6-метрового телескопа БТА. X. Позиционные и фотометрические характеристики кварцевого эшелле-спектрографа НЭС с крупноформатной матрицей “Уппсала ПЗС”

В.Е.Панчук[1], Н.Е.Пискунов[2], В.Г.Клочкова[1], М.В.Юшкин[1], С.В.Ермаков[1]

[1] Специальная астрофизическая обсерватория РАН, п.Нижний Архыз, 369167, Россия
[2] Астрономическая обсерватория университета г. Уппсала, Швеция

Аннотация. Приведены результаты адаптации матрицы ПЗС (2048×2048 элементов "Уппсала ПЗС") к эшелле-спектрографу с большим диаметром коллимированного пучка (НЭС), стационарно размещенному на платформе фокуса Нэсмита БТА. По сравнению с прежним светоприемником (матрицей ПЗС 1160×1040 элементов), проницающая способность спектрографа увеличилась на 2 зв. вел., втрое снизилась позиционная нестабильность спектрограмм, число одновременно передаваемых элементов спектра увеличено почти вчетверо. Приведены фрагменты спектров различных объектов, а также другая информация, позволяющая планировать наблюдения на спектрографе.

Spectral complex of the Nasmyth focus of the 6 m telescope. X. Positional and photometric characteristics of a quartz echelle spectrograph NES with a large format “Uppsala CCD”

V.E.Panchuk[1], N.E.Piskunov[2], V.G.Klochkova[1], M.V.Yushkin[1], S.V.Ermakov[1]

[1] Special Astrophysical Observatory RAS
[2] Astronomical University Observatory, Uppsala, Sweden

Abstract. Results are the presented of adaptation of a CCD (2048×2048 pixels, "Uppsala CCD") to an echelle spectrograph with a large collimated beam diameter (NES), which is located on the Nasmyth focus platform of BTA. Compared to the former detector (a CCD of 1160×1160 pixels), the throughput of the spectrograph has increased by 2 stellar magnitudes; the positional instability of spectrograms has diminished, the number of spectral elements transmitted simultaneously has increased by nearly a factor of 4. Spacimens of spectra of different objects and other information that makes it possible to plan observations with the spectrograph are presented.

1 Введение

Первый свет на спектрографе НЭС (Панчук и др., 1999) был зарегистрирован в начале 1998 г., весной были исследованы основные позиционные и фотометрические характеристики спектрографа (Клочкова и др., 1999). В течение первых трех лет эффективность спектрографа в значительной мере была понижена за счет использования в нем матрицы ПЗС (Маркелов и др., 1995), не перехватывающей по длине ни один из порядков эшелле-спектра (за исключением двух-трех порядков на УФ-границе окна атмосферной прозрачности). Вторым фактором, серьезно ограничивающим возможности НЭС, являлась низкая квантовая эффективность матрицы в синем и УФ-диапазонах.

Кварцевый камерный объектив спектрографа строит хорошие изображения в фокальной плоскости диаметром около 40 мм, и схема оптики не предусматривает использование полеспрямляющей линзы. Поэтому вопрос оснащения НЭС матрицей ПЗС большего формата не связывался с доработкой оптической схемы спектрографа.

Усилия по оснащению НЭС крупноформатной матрицей с хорошей чувствительностью в коротковолновой области спектра предприняты одним из авторов (Н.Е.Пискуновым) в течение 1999-2000 гг. В мае 2001 г. соответствующий комплект светоприемной аппаратуры — линии сбора, ЭВМ сбора и математического обеспечения — был доставлен на телескоп. Затем были выполнены работы по прокладке оптоволоконной линии связи, изготовлению механического адаптера модуля светоприемника, устанавливаемого вблизи фокальной плоскости камерного объектива, тестированию и настройке электроники, изготовлению нового блока управления затвором, доработке отдельных узлов калибровки, юстировке светоприемника, подбору режимов наблюдений. Спектрограф НЭС с матрицей 2048×2048 элементов Астрономической обсерватории университета г. Уппсала (Швеция) используется в плановых наблюдениях с июля 2001 г.

2 Позиционные характеристики

Несколько неожиданным было обнаружение в 1998 г. позиционных нестабильностей, не связанных непосредственно с оптико-механической конструкцией спектрографа (Клочкова и др., 1999). Мы показали, что эти нестабильности возникают непосредственно в модуле светоприемника: дополнительные аргументы были получены в результате исследований этого же светоприемника на других эшелле спектрографах БТА (Панчук и др., 2001а,б).

Позиционная стабильность НЭС с новой матрицей ПЗС изучалась так же, как и при исследованиях с прежней матрицей ПЗС (Клочкова и др., 1999). Были выполнены две серии экспериментов — при неподвижном и подвижном телескопе. Определения положений линий спектра сравнения при неподвижном телескопе показали, что характер изменения положения линий со временем такой же, как и с прежним светоприемником (см. рис. 7 в работе Клочковой и др., 1999), но амплитуда изменений значительно уменьшилась. Затем были выполнены измерения положений линий при различных режимах работы телескопа (наведение, повторное наведение, сопровождение объекта). На рис. 1 приведен пример синхронных измерений температуры в подкупольном пространстве (сверху) и смещений линий спектра сравнения (внизу). Вертикальными линиями разделены различные состояния телескопа. В состояниях "I" телескоп неподвижен, забрало башни БТА закрыто. В состоянии "II" башня также закрыта, но телескоп сопровождает "объект" в течение 6 часов (без повторных наведений и коррекции положения). В состоянии "III" на телескопе выполняются наблюдения с аппаратурой, размещенной в первичном фокусе (наведение на объекты и сопровождение объектов). Изменение положения линий спектра сравнения не коррелирует с азимутом и зенитным расстоянием объекта как при сопровождении с закрытым забралом, так и в процессе реальных наблюдений. Мы предполагаем, что основной причиной смещения линий является изменение температуры деталей спектрографа. Приходим к выводу, что при использовании прежнего светоприемника главным источником позиционных нестабильностей являлись смещения, происходящие в модуле светоприемника, т.е. вклад нежесткости спектрографа был мал по сравнению со смещениями в модуле светоприемника и выделить его не удалось. С новой матрицей мы выделили смещения, коррелирующие с изменениями температуры, что позволяет выполнять учет таких смещений, соблюдая необходимый режим калибровок.

Зарегистрированные нестабильности не изменяют значимо ширину пика аппаратной функции, но ограничивают точность измерения лучевых скоростей. Например, из рис. 1 следует, что сдвиг между соседними спектрами сравнения, вызванный нестабильностями, не превосходит 0.05 пикселя/час, что проявится в изменении лучевой скорости не более чем на 80 м/с в течение часового интервала между экспозициями. Если экспозиции спектра сравнения выполнять до и после научной экспозиции и предположить, что в течение научной экспозиции сдвиг нарастает линейно, то ошибка определения лучевой скорости вследствие нестабильностей светоприемника не превысит 10 м/с. Достижение такой точности в полной процедуре измерения лучевых скоростей будет ограничиваться, скорее, эффектами смещения центра тяжести изображения щели в разных длинах волн и эффектами неидентичного заполнения оптики спектрографа излучением исследуемого объекта и излучением источника спектра сравнения. Поэтому считаем, что обнаруженные нестабильности не окажут влияние на результаты большинства программ, выполняемых сегодня на НЭС.

3 Фотометрические характеристики

Основу светоприемника составляет матрица ПЗС производства Ford-Loral, обработанная в ПЗС-лаборатории обсерватории Steward. Для регистрации изображения выделены 2048×2048 элементов (пикселей), размер пикселя составляет 15×15 мкм. Матрица установлена в камеру, построенную в обсерватории Копенгагенского университета (Соренсен, 2001). Ниже приведем некоторые характеристики светоприемника, по данным лабораторных испытаний, проведенных разработчиком. При сопоставлении экспозиций с низким и высоким уровнями освещенности выявлено полдюжины дефектных столбцов и около двух десятков ловушек. Шум считывания составляет $7.7e^-$, темновой ток не превышает $2e^-$ в час. Неэффективность переноса заряда не превышает 0.000005 (ошибка измерений составляла 2×10^{-6}). Квантовая эффективность равна 60% на 3500 Å, 75% на 4000 Å, возрастает до 90% на 5500 Å, затем плавно снижается до 60% на 8000 Å и 10% на 10000 Å. Средний уровень космических частиц составляет 700 событий на всю площадь светоприемника за час.

Оценку проницающей способности выполнили, используя результаты наблюдений по научным программам. На рис. 2 приведены зависимости отношения сигнал/шум, измеренного в спектрах вблизи максимумов кривой реакции фильтров B и V, от звездной величины. Время экспозиции 1 час, ширина щели 0.6 угл. сек., качество изображений 1 угл. сек., зенитное расстояние 45°. Наблюдения выполнялись с локальным корректором положения звезды (Иванов и др., 2001). Сравнение с данными рис. 15 работы Клочковой и др. (1999) позволяет сделать вывод, что переход на новую матрицу ПЗС привел к увеличению проницающей способности на 2 зв. вел. в фильтре V. Замена старой "красной" ПЗС-матрицы на прибор с хорошей чувствительностью в синем диапазоне, привела к увеличению проницающей способности спектрографа в УФ-диапазоне (3500–3800 ÅÅ) более чем на 4 зв. вел. Следует заметить, что "чистое" сравнение квантовой эффективности матриц выполнить не удалось, т.к. в апреле 2001 г. перед сменой светоприемника была выполнена замена плоских зеркал оптики коллиматора, и указанный эффект замены матрицы ПЗС включает выигрыш за счет использования двух новых отражающих покрытий. На рис. 2 приведены также вычисления проницающей способности, выполненные по известной формуле, приведенной в работе Клочковой и др. (1999), связывающей параметры ПЗС (шум считывания, темновой ток), с экспериментально определенной эффективностью для звезды заданной величины, временем экспозиции и отношением S/N. Видно, что при хорошем качестве звездных изображений b роль шумов считывания начинает проявляться при спектрофотометрии звезд слабее $m_V = 12$. Сдвиг экспериментальной кривой проницающей способности, полученной в цвете B относительно кривой в V, соответствует данным лабораторных измерений спектральной чувствительности светоприемника (Соренсен, 2001). На рис. 3 приведены результаты вычислений проницающей способности для различного качества звездных изображений b в цвете V.

Известно, что ПЗС-матрицы с повышенной чувствительностью в синем диапазоне обладают более ярко выраженными интерференционными эффектами в красном и ИК-диапазонах (fringes), возникающими непосредственно в светочувствительной области приемника. Для иллюстрации указанных эффектов были получены спектрограммы лампы непрерывного спектра в диапазоне длин волн 3500–10000 ÅÅ. Колебания уровня непрерывного спектра, как результат интерференции, обнаружены, начиная с 6600 Å, где их амплитуда составляет величину порядка 1%. На рис. 4 приведены примеры фотометрических разрезов для избранных спектральных порядков с номером m. Все наблюдаемые детали на спектре, как широкие, так и узкие, возникают внутри светоприемника. Учет интерференционных эффектов требует соблюдения условия идентичного заполнения оптики спектрографа при калибровке и наблюдениях исследуемого объекта, что практически трудноосуществимо. Приходим к выводу, что для прецизионных фотометрических исследований предпочтительным для НЭС является диапазон длин волн короче 7000 Å.

4 Параметры эшелле-кадров

В настоящее время узел скрещенной дисперсии НЭС состоит из двух дифракционных решеток (300 и 600 штр/мм), работающих в первом порядке дифракции, установленных на общем основании так, что поворотом узла одна из решеток вводится в оптическую схему, а затем тонким движением поворотного стола выполняется выбор порядков эшелле, которые необходимо зарегистрировать в одном кадре. Ввод крупноформатной матрицы существенно снижает число кадров, необходимое для регистрации всего спектрального диапазона, определяемого кривой спектральной чувствительности матрицы и оптикой камерного объектива. В табл. 1 приведены: номер спектрального порядка m, значение обратной линейной дисперсии в расчете на пиксель D(Å/pix), длина волны начала (λ_{min}) и конца (λ_{max}) порядка, расстояние между осями соседних порядков h(pix), измеренное для случая применения решетки 300 штр/мм. Эта решетка является основной рабочей, т.к. обеспечивает плотную упаковку порядков в кадре. При этом для $\lambda >$4500 Å возможны наблюдения как с резателем изображений (на три среза), так и с анализатором круговой поляризации. Решетка 600 штр/мм используется в случаях:

- наблюдений с анализатором круговой поляризации в УФ-диапазоне,
- наблюдениях с резателем изображений в УФ-диапазоне,
- наблюдений протяженных объектов с высокой щелью,
- наблюдений точечных объектов с высокими требованиями к уровню рассеянного света между порядками.

Из табл.1 следует, что перекрытие соседних порядков обеспечивается для $\lambda <$ 6100 Å, а в более длинноволновой области для регистрации линий, не попадающих в кадр, необходимо изменить угол падения на эшелле. Так как эшелле работает вне главной плоскости, то при изменении угла падения, кроме изменения интервала длин волн, регистрируемого в данном порядке, изменяется и расположение порядков в кадре, поэтому после изменения угла падения на эшелле следует слегка изменить угол падения на решетку скрещенной дисперсии.

5 Примеры наблюдательного материала

Увеличение информативности НЭС, обеспеченное заменой светоприемника и доработками конструкции спектрографа, позволило расширить круг наблюдательных программ. За год работы с новым светоприемником на НЭС нами обеспечивалось выполнение следующих программ:

1. Зееман-доплеровское картирование звездных атмосфер.

2. Атмосферы и околозвездные оболочки на стадии post-AGB.

3. Химический состав звезд с дефицитом металлов.

4. Химический состав звезд с избытком тяжелых элементов.

5. Магнитные поля звезд на главной последовательности.

6. Спектроскопия Ве-звезд.

7. Спектроскопия пульсирующих звезд.

8. Спектроскопия звезд предельно высокой светимости.

9. Спектроскопия туманностей.

Часть этих программ проиллюстрируем фрагментами спектров (рис. 5-11).

На рис. 5 приведен фрагмент спектра центральной части северного лепестка биполярной туманности AFGL 2688 ($m_{\rm V} = 15$).

На рис. 6 приведены фрагменты спектра α^2 CVn, полученного с анализатором круговой и линейной поляризации.

На рис. 7 приведены фрагменты спектров звезд близкой температуры, расположенные в порядке возрастания металличности (сверху вниз). В спектре наиболее низкометалличной звезды ([Fe/H] = -2.9 dex) усилены линии элементов, синтезируемых в r-процессе (линия Eu II 4129.7Å).

На рис. 8 приведен фрагмент спектра малометалличной звезды в районе линии тория (Th II 4019.1Å).

На рис. 9 приведен фрагмент спектра Ве-звезды с инфракрасным избытком.

На рис. 10 приведены фрагменты эшелле-изображений спектров туманностей NGC 6543 (a), на врезке – запрещенная линия [O III] λ4995 Å со сложным профилем; и туманности IC 3568 (b), известной своей сферически-симметричной структурой, на врезке – линии [O III] λ4995 Å (слева–вверху) и H_β (справа–внизу).

На рис. 11 приведены фрагменты спектров звезд разных типов в области дублета натрия и линии гелия (сверху-вниз: V838 Mon, IRAS 02441+6922, CI Cam).

Благодарности. Работа по оснащению спектрографа НЭС крупноформатной матрицей выполнена при поддержке Шведского национального исследовательского комитета (Swedish National Research Counsil). Адаптация светоприемника, исследование новых вариантов наблюдений и ввод спектрографа в опытную эксплуатацию частично поддержаны Российским фондом фундаментальных исследований (проекты 01-02-16093а и 02-02-16085), Федеральной целевой научно-технической программой "Астрономия" (подпроект 1).

Список литературы

Иванов А.А., Панчук В.Е., Шергин В.С., 2001, Препринт САО N155.

Клочкова В.Г., Ермаков С.В., Панчук В.Е., Таволжанская Н.С., Юшкин М.В., 1999, Препринт САО N137.

Маркелов С.В., Мурзин В.А., Борисенко А.Н. S1000. Система регистрации астрономических изображений на матрице ПЗС 1040x1160. Нижний Архыз, 1995, 24с.

Панчук В.Е., Клочкова В.Г., Найденов И.Д., 1999, Препринт САО N135.

Панчук В.Е., Клочкова В.Г., Юшкин М.В., Романенко В.П., Найденов И.Д., Ермаков С.В., 2001а, Препринт САО N159.

Панчук В.Е., Клочкова В.Г., Найденов И.Д., Романенко В.П., Ермаков С.В., Юшкин М.В., 2001б, Препринт САО N160.

Соренсен (A.N. Sorensen), Test report on the ESO Lot 1 W17-(1,1) CCD detector. IJAF, Copenhagen University Observatory, March 2001.

Таблица 1: Параметры эшелле-кадра

m	D Å/pix	λ_{min} Å	λ_{max} Å	h pix
134	0.0219	3514	3559	
133	0.0220	3540	3585	35.3
132	0.0222	3567	3613	36.3
131	0.0224	3594	3640	37.1
130	0.0225	3621	3668	38.3
129	0.0227	3649	3696	37.8
128	0.0229	3677	3724	38.9
127	0.0231	3706	3753	39.2
126	0.0232	3735	3783	40.5
125	0.0234	3765	3813	40.3
124	0.0236	3795	3843	41.7
123	0.0238	3825	3874	42.2
122	0.0240	3856	3906	42.7
121	0.0242	3888	3938	43.3
120	0.0244	3920	3970	44.1
119	0.0246	3953	4003	44.7
118	0.0248	3986	4037	45.6
117	0.0250	4020	4071	46.0
116	0.0252	4054	4106	47.3
115	0.0254	4089	4141	47.7
114	0.0257	4124	4177	48.7
113	0.0259	4160	4213	49.6
112	0.0261	4197	4251	50.2
111	0.0264	4234	4288	51.2
110	0.0266	4273	4327	51.7
109	0.0268	4311	4366	53.3
108	0.0271	4351	4406	54.0
107	0.0273	4391	4447	54.9
106	0.0276	4432	4489	55.7
105	0.0279	4474	4531	57.0
104	0.0281	4516	4574	57.9
103	0.0284	4559	4618	59.0
102	0.0287	4604	4662	60.2
101	0.0290	4649	4708	61.8
100	0.0293	4695	4755	63.0
99	0.0295	4741	4802	64.2
98	0.0298	4789	4850	65.3
97	0.0302	4838	4900	66.7
96	0.0305	4888	4950	68.0
95	0.0308	4939	5002	69.3
94	0.0310	4996	5059	70.9
93	0.0313	5049	5113	72.2

Таблица 1: Параметры эшелле-кадра (продолжение)

m	D Å/pix	λ_{min} Å	λ_{max} Å	h pix
92	0.0317	5103	5168	73.8
91	0.0320	5158	5224	75.2
90	0.0324	5215	5281	76.8
89	0.0327	5273	5340	78.4
88	0.0331	5332	5400	80.2
87	0.0335	5392	5461	82.1
86	0.0339	5455	5523	83.5
85	0.0343	5517	5587	85.6
84	0.0347	5582	5653	87.5
83	0.0351	5648	5720	89.5
82	0.0355	5716	5789	91.6
81	0.0359	5785	5859	93.7
80	0.0363	5857	5931	95.9
79	0.0367	5930	6005	98.1
78	0.0372	6001	6077	101.4
77	0.0377	6078	6155	103.9
76	0.0382	6156	6234	106.4
75	0.0387	6237	6316	109.1
74	0.0392	6320	6400	112.5
73	0.0397	6405	6486	114.4
72	0.0403	6493	6575	117.8
71	0.0409	6583	6666	121.0
70	0.0415	6675	6760	124.2
69	0.0421	6770	6856	127.5
68	0.0427	6868	6955	131.0
67	0.0433	6968	7057	134.8
66	0.0440	7072	7162	138.6
65	0.0447	7179	7270	142.5
64	0.0452	7293	7385	147.8
63	0.0459	7407	7500	152.4
62	0.0466	7524	7619	156.9
61	0.0474	7645	7742	161.7
60	0.0482	7770	7868	166.6
59	0.0490	7899	7999	171.8
58	0.0499	8032	8134	177.2
57	0.0507	8170	8273	183.1
56	0.0516	8313	8418	189.3
55	0.0525	8461	8568	195.4
54	0.0533	8619	8728	204.1
53	0.0543	8778	8889	211.3
52	0.0554	8943	9056	218.2

Таблица 1: Параметры эшелле-кадра (продолжение)

m	D Å/pix	λ_{min} Å	λ_{max} Å	h pix
51	0.0565	9114	9230	227.1
50	0.0576	9292	9410	234.8
49	0.0588	9477	9597	244.1
48	0.0600	9670	9792	252.7
47	0.0613	9870	9995	263.1

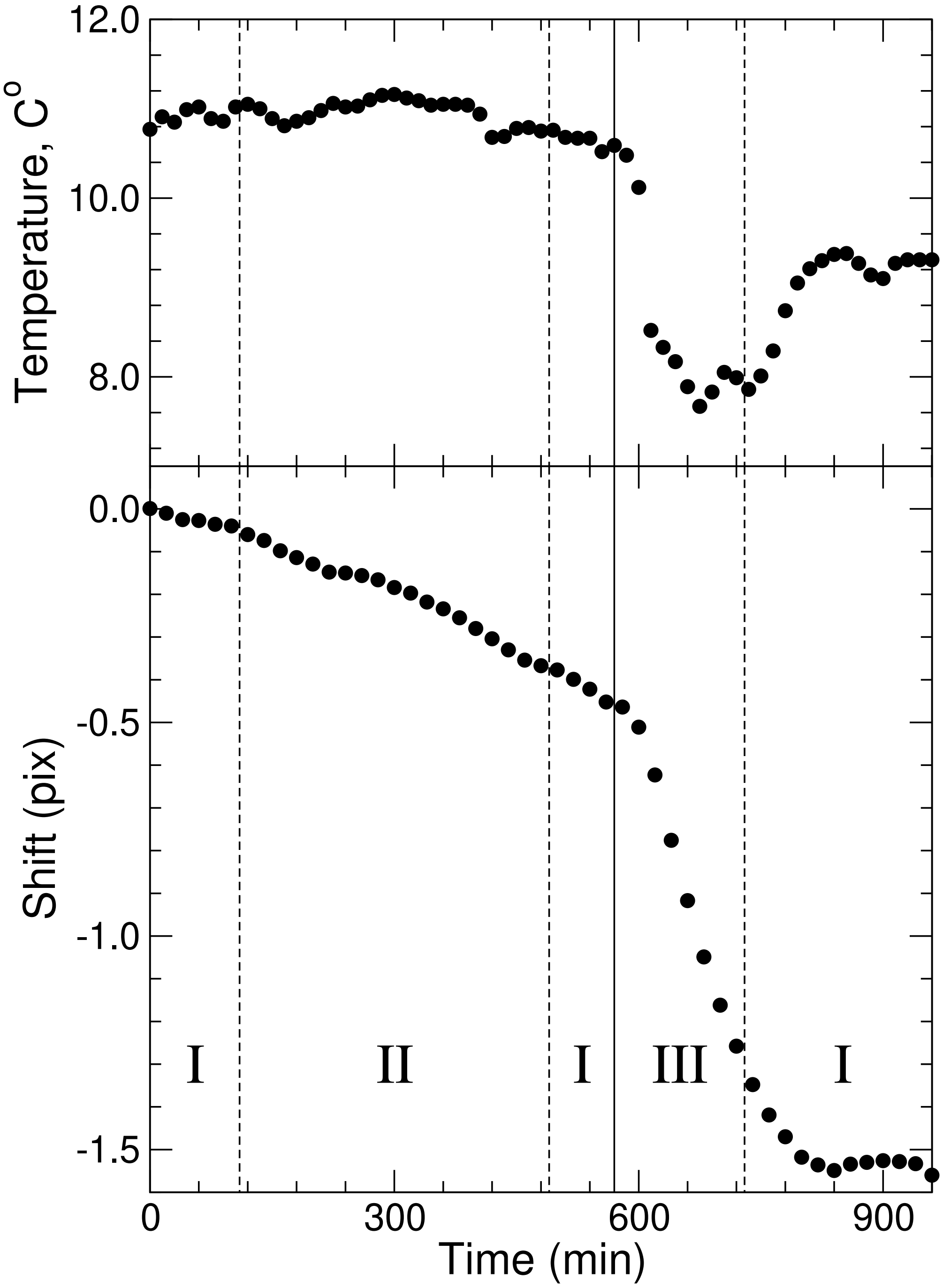

Рис. 1: Смещения положения линий спектра сравнения, полученные для серии из 49-ти экспозиций при подвижном и неподвижном телескопе. Вертикальные линии разделяют состояния телескопа:

I – телескоп неподвижен,

II – сопровождение телескопом "объекта" при закрытом куполе,

III – реальные наблюдения на телескопе при открытом куполе.

Вертикальная сплошная линия отмечает время открытия забрала. Сверху приведен график изменения температуры в подкупольном пространстве.

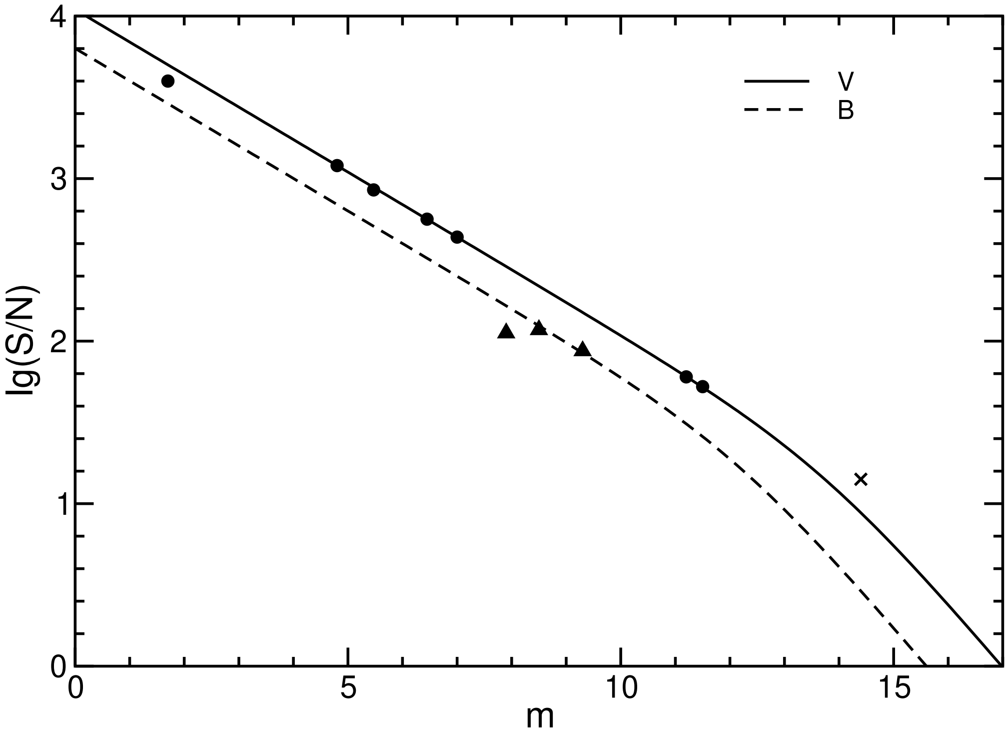

Рис. 2: Проницающая способность НЭС в полосах B (треугольники) и V (кружки). Расчетные кривые нормированы с учетом оригинальных наблюдений. Крестиком показан результат наблюдения северного лепестка биполярной туманности AFGL 2688 с резателем изображения в полосе V.

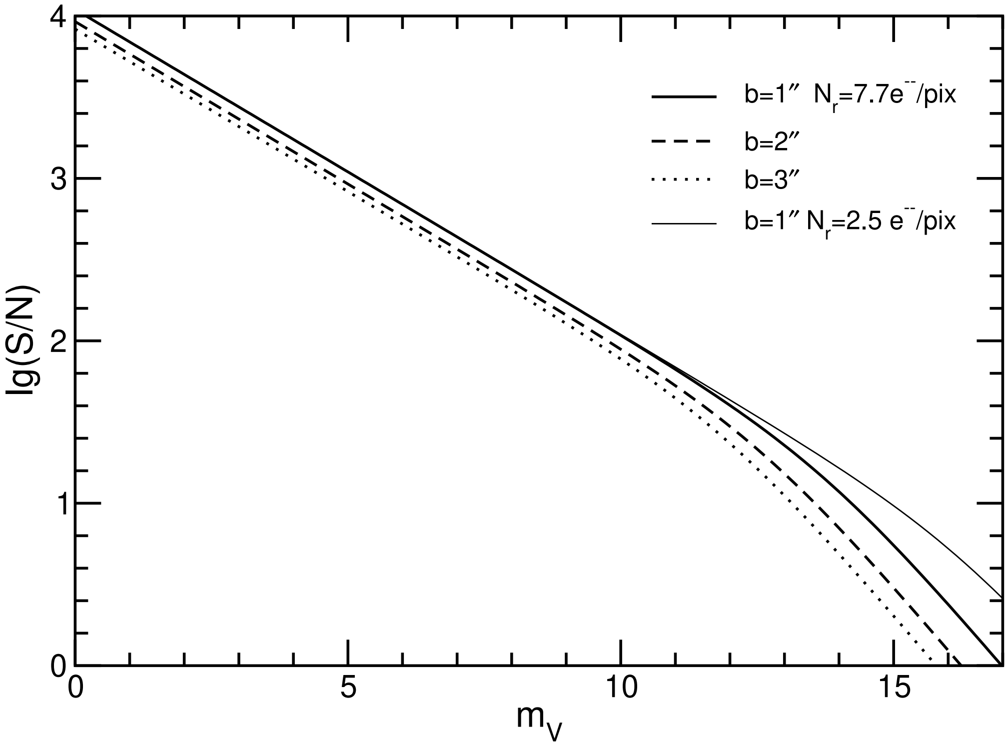

Рис. 3: Кривые проницающей способности в полосе V, рассчитанные для различных диаметров звездных изображений b.

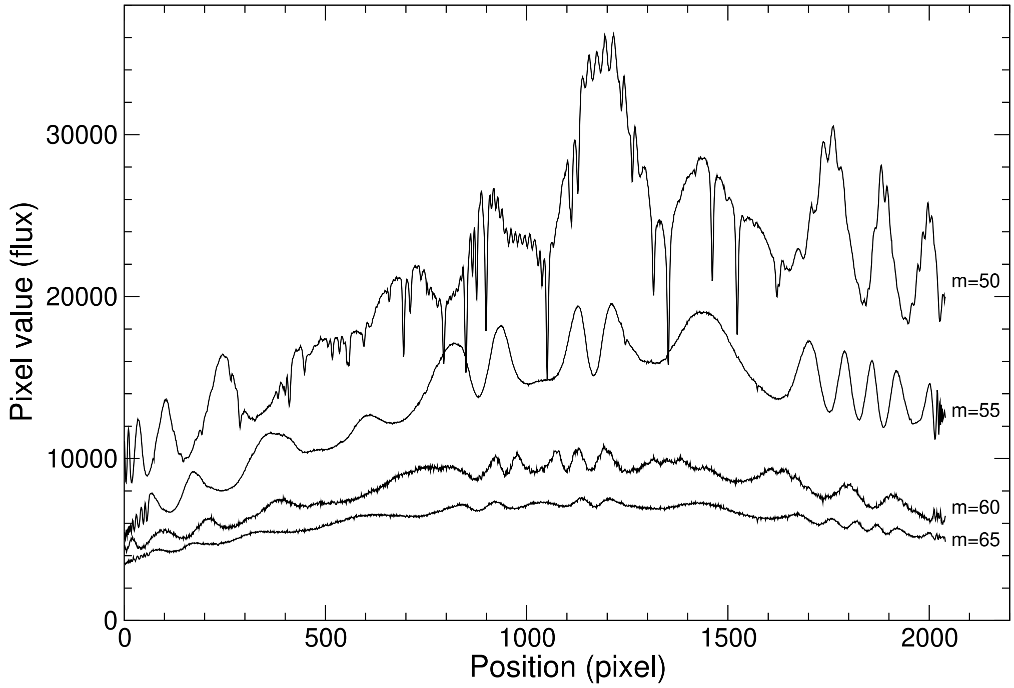

Рис. 4: Примеры фотометрических разрезов спектрограммы лампы непрерывного спектра для избранных спектральных порядков с номером m.

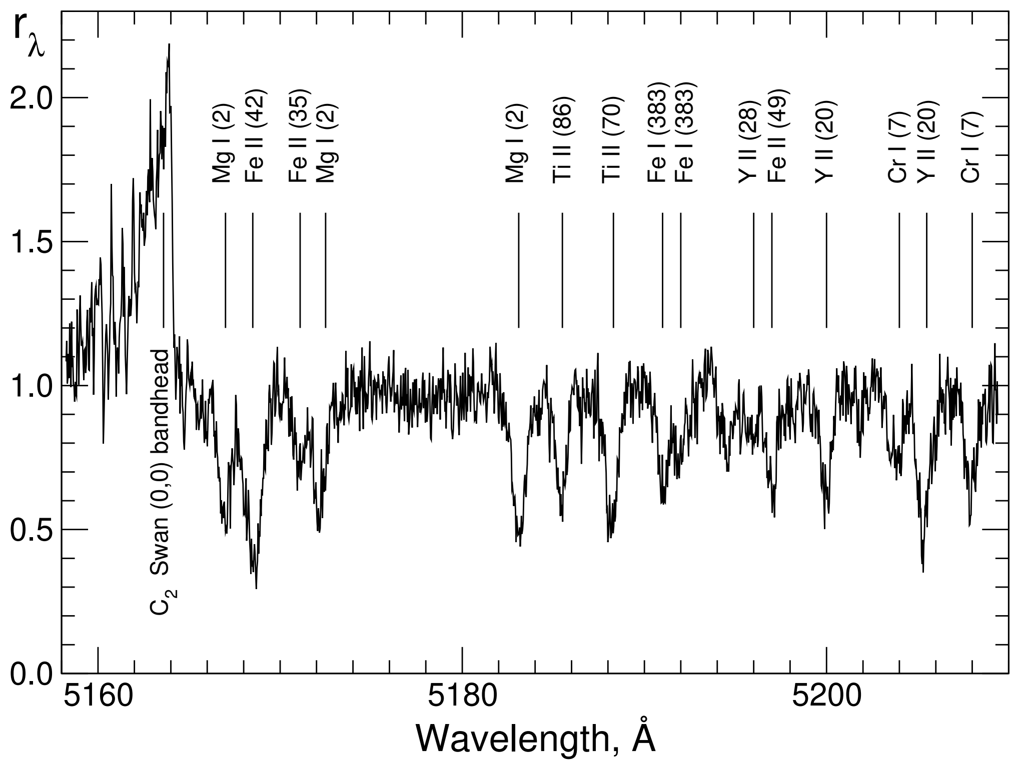

Рис. 5: Фрагмент спектра центральной части северного лепестка биполярной туманности AFGL 2688 (эффективная звездная величина на щели спектрографа $m_{\rm V} = 15$).

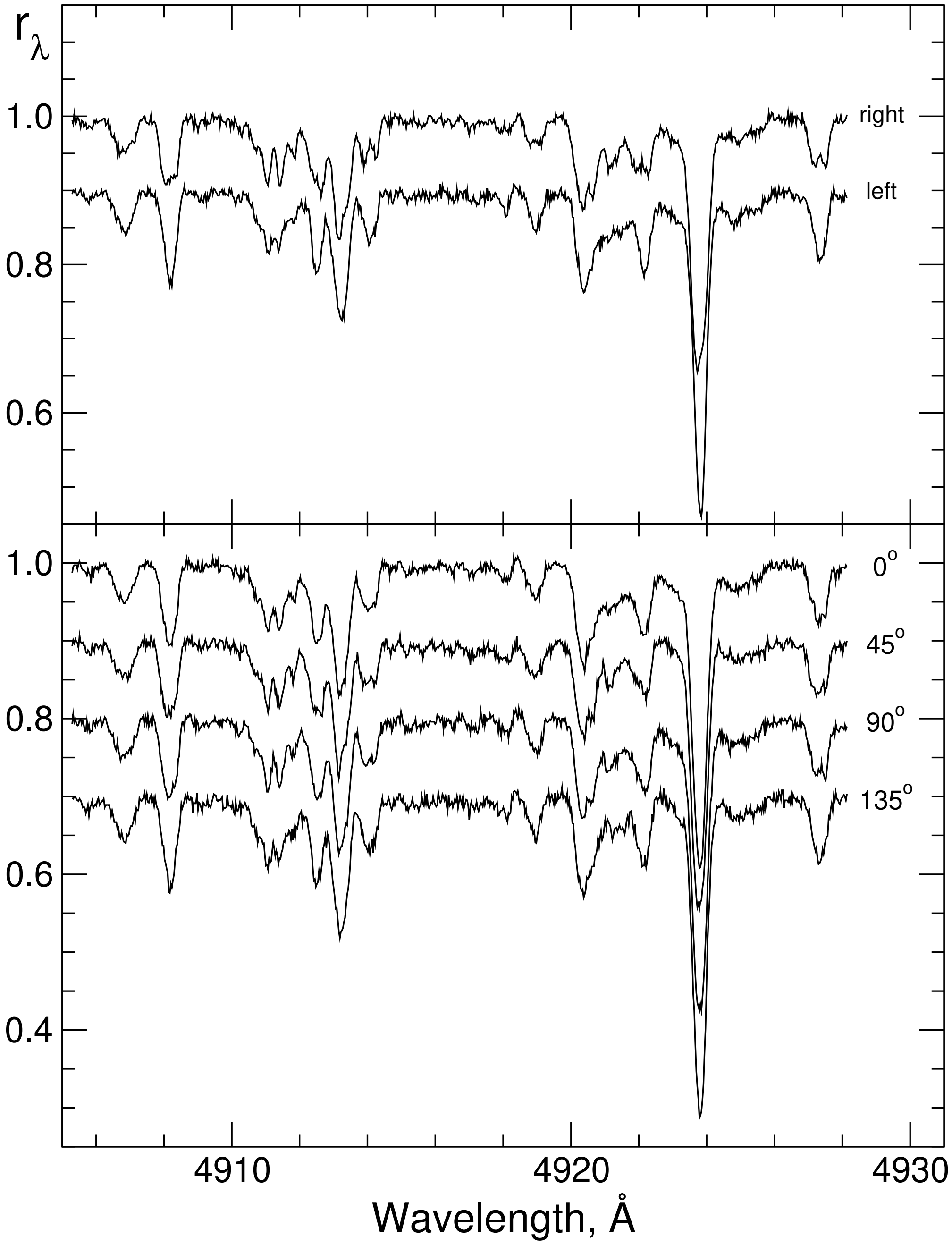

Рис. 6: Фрагменты спектра α^2 CVn, полученного с анализатором круговой (верхний рисунок) и линейной поляризации (нижний рисунок). Около спектров указаны: знак круговой поляризации и угол главной плоскости анализатора линейной поляризации.

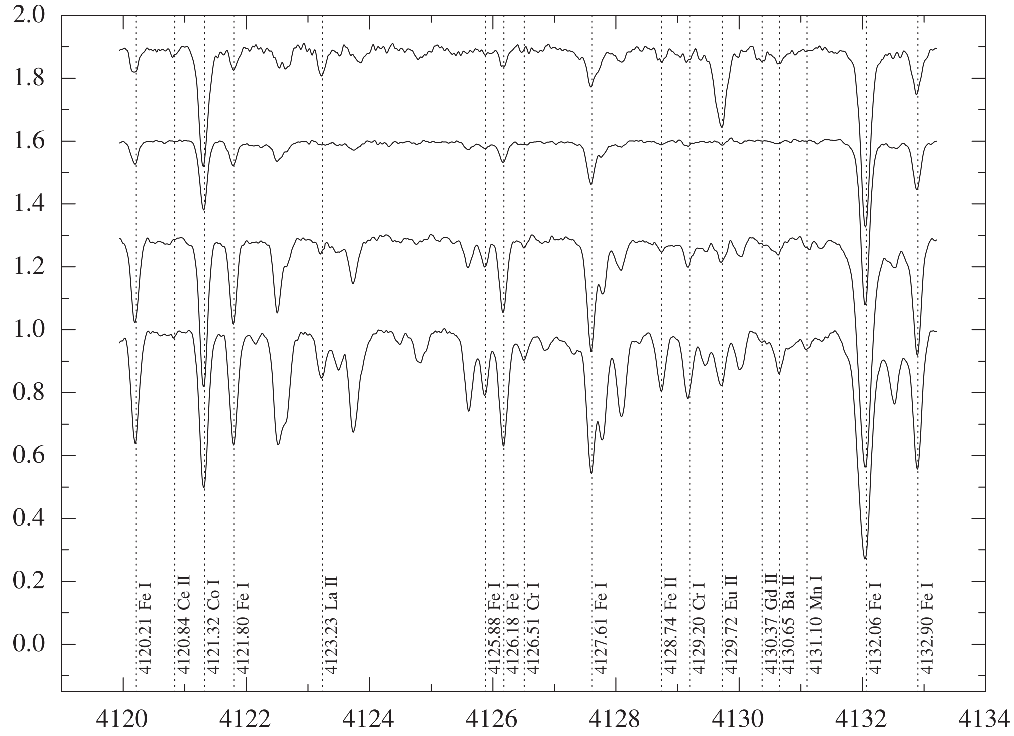

Рис. 7: Фрагменты спектров звезд близкой температуры, расположенные в порядке возрастания металличности (сверху вниз). В спектре наиболее низкометалличной звезды ([Fe/H] = -2.9 dex) усилены линии элементов, синтезируемых в r-процессе (линия Eu II 4129.7Å).

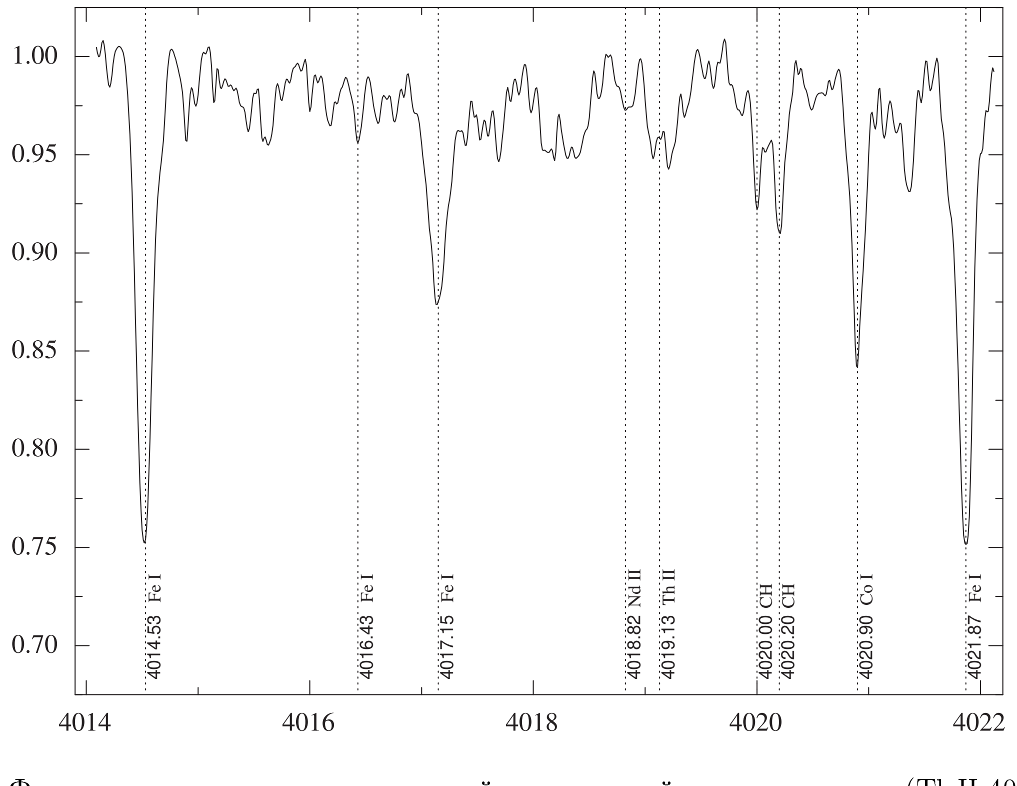

Рис. 8: Фрагмент спектра малометалличной звезды в районе линии тория (Th II 4019.1Å).

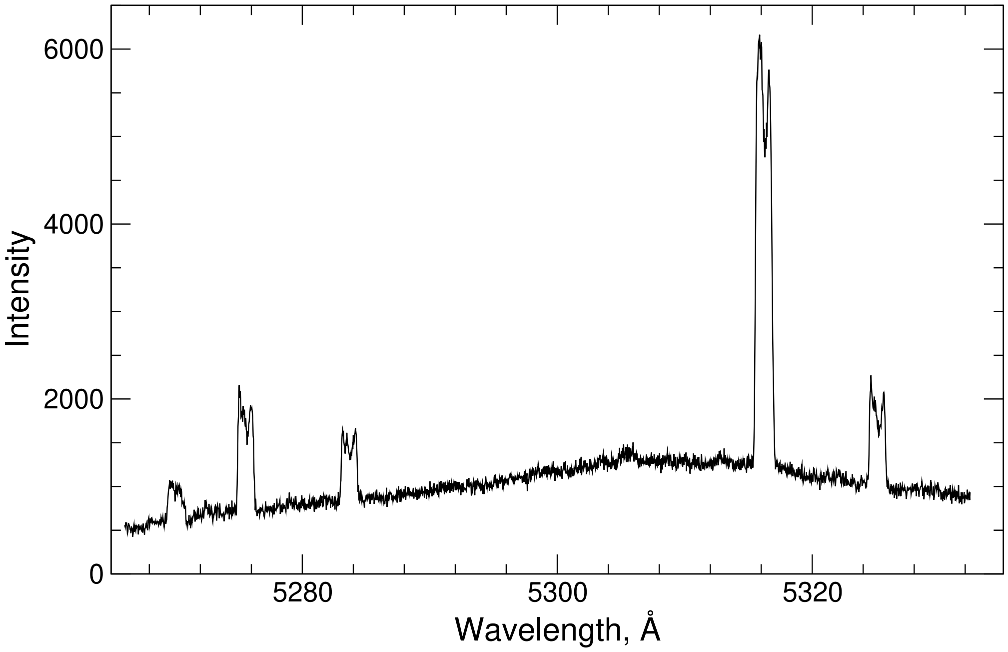

Рис. 9: Фрагмент спектра Be-звезды с инфракрасным избытком.

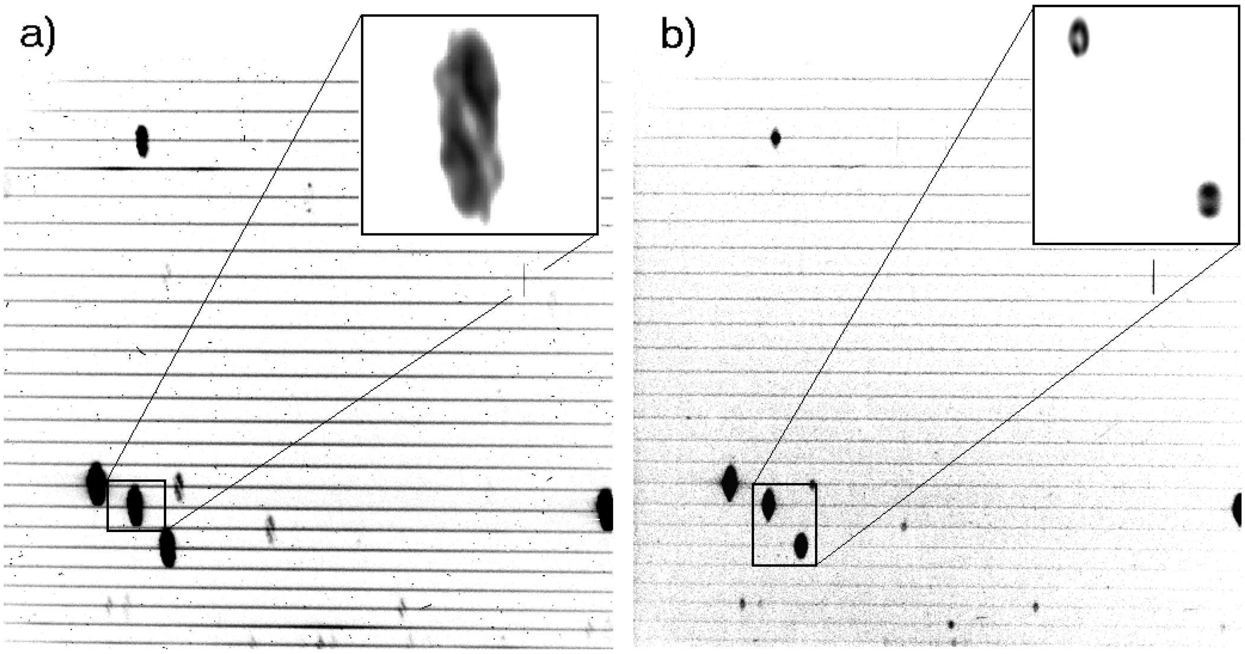

Рис. 10: Фрагменты эшелле изображений спектров: a) туманности NGC 6543, на врезке – запрещенная линия [O III] $\lambda 4995$ Å со сложным профилем; b) туманности IC 3568, известной своей сферически-симметричной структурой, на врезке – линии [O III] $\lambda 4995$ Å (слева-вверху) и H_β (справа-внизу).

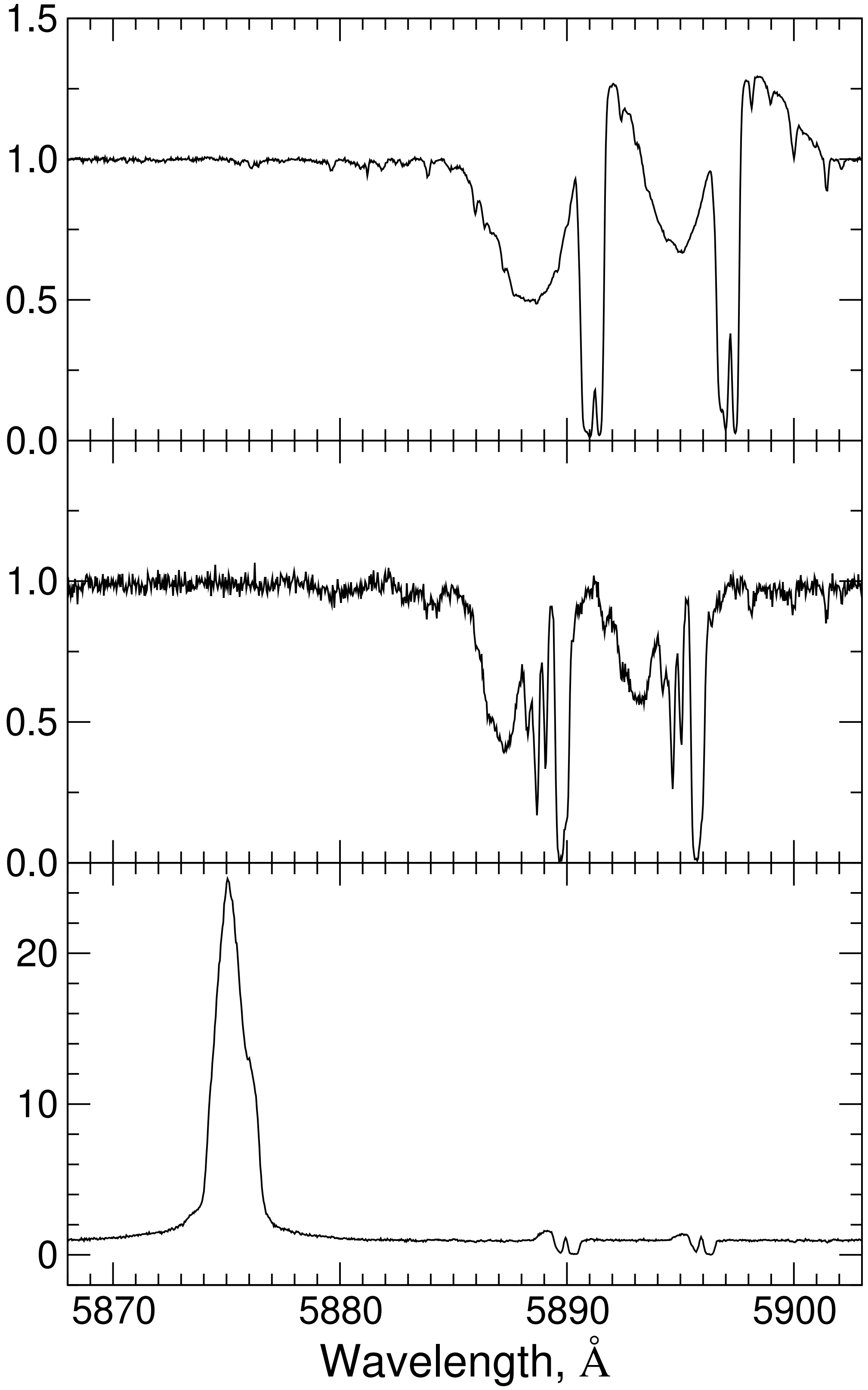

Рис. 11: Фрагменты спектров звезд разных типов в области дублета натрия и линии гелия (сверху-вниз: V838 Mon, IRAS 02441+6922, CI Cam).