УДК 524.314.7(084); 524.316.2(084)

Атлас спектров F- и G-звезд

В.Г. Клочкова, С.В. Ермаков, В.Е. Панчук

Специальная астрофизическая обсерватория РАН, п.Нижний Архыз, 369167, Россия

Аннотация. Представлен атлас спектров ярких звезд в диапазоне спектральных классов F и G и классов светимостей I–V. Спектральное разрешение R=15000, диапазон длин волн 4540–6620 Å. Даны примеры спектров звезд с разным значением металличности [Fe/H].

Atlas of spectra of F and G stars

V.G. Klochkova, S.V. Ermakov, V.E. Panchuk

Special Astrophysical Observatory RAS

Abstract. An atlas of spectra of bright stars in the range of spectral classes F and G and luminosity classes I–V is presented. The spectral resolution is R=15000, the wavelength range — 4500–6620 Å. Examples of spectra of stars with different metallicity [Fe/H] are given.

1 Введение

Первый этап применения приборов с зарядовой связью (ПЗС) в астрономической спектроскопии определялся преимущественно наблюдениями в красном диапазоне спектра (применение "толстых" приборов). Сразу обнаружилось, что весь опыт классификации и стандартизации звездных спектров в фотографической (преимущественно синей) области спектра неприменим, необходимы новые наблюдения по созданию спектроскопических стандартов в красном диапазоне. Применение матриц ПЗС в классических спектрографах фокуса Кудэ серьезно ограничивало длину одновременно регистрируемого спектрального интервала, поэтому работа по созданию атласов спектров стала возможной только после появления эшелле-спектрографов с матрицами ПЗС.

На эшелле-спектрографах 6-м телескопа САО РАН выполняются, в числе других, программы исследования звезд на продвинутых стадиях эволюции (Клочкова, 1995) и непроэволюционировавших звезд гало (Клочкова и Панчук, 1995). В процессе выполнения этих программ мы неоднократно сталкивались с необходимостью получения спектров звезд сравнения как для дифференциальных определений химического состава, так и для выявления эффектов быстрой эволюции спектров. Значительная часть наблюдательных программ других авторов, которые мы систематически выполняем на спектрографах 6-м телескопа, также требует наблюдений стандартных звезд. Не всегда такие наблюдения удается выполнить в официально отведенные для этого ночи. С другой стороны, не всегда по метеоусловиям данной ночи удается выполнять основную наблюдательную программу, и, чтобы подготовленная к наблюдениям аппаратура не простаивала, можно наблюдать более яркие звезды. Опыт составления атласов спектров избранных объектов по наблюдениям на эшелле-спектрографах 6-м телескопа уже имеется (Ченцов и др., 1997, 1999). Перечисленные причины являются основанием для создания атласа спектров ярких звезд по наблюдениям на 6-м телескопе.

Специфика наблюдений на эшелле-спектрографах больших телескопов состоит прежде всего в том, что в одном эшелле-кадре невозможно одновременно разместить весь спектральный интервал, определяемый кривой чувствительности светоприемника. Факторами, ограничивающими число одновременно регистрируемых порядков, являются: а) линейный масштаб звездных изображений, определяющий долю площади светоприемника, отводимой для одного эшелле-порядка; б) расстояние между соседними порядками, определяемое, в основном, требованиями к уровню рассеянного света в спектрографе. Поэтому спектр высокого разрешения регистрируется по частям. При выполнении различных программ внимание уделяется различным спектральным диапазонам, и в таком режиме наблюдений трудно накопить однородный спектральный материал, необходимый для составления атласа спектров нескольких десятков объектов. Итак, без официального выделения наблюдательного времени, работа по набору наблюдательного материала, необходимого для составления атласа звездных спектров, растягивается на годы.

Значительную часть наблюдений слабых звезд с высоким спектральным разрешением мы выполняем на эшелле спектрографе первичного фокуса PFES (Панчук и др., 1998; Панчук и Ермаков, 1999). К настоящему времени на PFES получено несколько сотен эшелле-спектров звезд различных температур и светимостей. Длина одновременно регистрируемого диапазона составляет около 2500 A, поэтому работу по составлению атласа звездных спектров предпочтительнее начать по спектрограммам, полученным на этом спектрографе.

Большая часть объектов наших программ имеет температуры, соответствующие спектральным классам F и G двумерной спектральной классификации, поэтому в данной работе мы ограничились только спектральными классами F и G.

2 Наблюдения и обработка спектров

Все наблюдения выполнены в интервалы времени, непригодные для выполнения официальных наблюдательных программ (качество изображений хуже $4''$, облачность или плотная дымка). Синий и ультрафиолетовый диапазоны не регистрировались, поэтому часть наблюдений мы выполнили в сумерках. Для составления данного атласа отобраны спектрограммы, полученные с близкими значениями спектрального разрешения (определяемым шириной щели и качеством юстировки спектрографа). Вариации спектрального разрешения можно оценить по теллурическому спектру, наблюдаемому в районе линии Hα. Спектральный диапазон был также выбран одинаковым. Мы не стали включать в данный атлас длинноволновые порядки, содержащие преимущественно теллурические полосы молекулярного кислорода и водяного пара. В качестве источника спектра сравнения использована лампа Th+Ar, для построения дисперсионной кривой использовались также спектрограммы дневного неба. Обработка эшелле изображений выполнена в контексте MIDAS (1999), обработка одномерных спектров (векторов) — при помощи алгоритмов DECH (Клочкова и Галазутдинов, 1991; Галазутдинов, 1992), для формирования атласа были написаны дополнительные программы. Влияние основных "косметических" дефектов использованной матрицы ПЗС исключено на этапе работы с векторами. Для удобства работы с атласом все векторы отдельных спектральных порядков сдвинуты относительно друг друга, т.е. информация о лучевых скоростях в атласе отсутствует (но осталась на оригинальных спектрах). Сигнал, накопленный на краях спектральных порядков, в 3-5 раз ниже сигнала в центре порядка, но, так как спектры получены с достаточно большим накоплением, роль шумов в данном атласе практически исключена.

3 Атлас спектров

Список звезд, включенных в публикуемую часть атласа, приведен в Таб. 1 и 2. Информация заимствована, в основном, из каталога BS (Хоффлейт и Уоррен, 1991). Каждый спектральный порядок изображен на двух страницах атласа, по 10 звезд на странице. На рисунках 1-16 отмечены спектральные классы и значения проекции скорости осевого вращения, и порядок следования объектов такой же, как и в Таб. 1. Для ориентировки на каждом спектральном порядке отмечено несколько линий, информация о которых содержится в

Таб. 3 (параметры линий были взяты из базы данных VALD (Пискунов и др., 1995; Купка и др., 1999; Рябчикова и др., 1999). При указанном (фиксированном) спектральном разрешении для всех объектов с Vsini<20км/сек глубина линий практически не зависит от Vsini, и определяется только условиями возбуждения и ионизации в звездной атмосфере. Отдельно, на Рис. 17, для избранных порядков проиллюстрированы эффекты металличности. На всех рисунках относительный сдвиг спектров по ординате составляет 0.75 в единицах остаточной интенсивности.

Большинство звезд из Таб. 1 исследовано методом моделей атмосфер (Керель и др., 2001). Поэтому публикуемый материал в основном пригоден для уточнения спектральных критериев температуры, ускорения силы тяжести и металличности (см., например, Клочкова и Топильская, 1996). С привлечением энергетической привязки (восстанавливающей отношение потоков между спектральными порядками), атлас может быть пригоден и для расчета интегральных спектров звездных систем.

Результаты наблюдений звезд других спектральных классов будут опубликованы отдельно.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты NN 00-02-17689, 01-02-16093а).

Список литературы

Галазутдинов Г.А., 1992, Препринт САО N92

Керель и др. (Cayrel de Strobel G., Soubiran C., Ralite N.), 2001, Astron. Astrophys., **373**, 159

Клочкова (Klochkova V.G.), 1995, Mon. Not. R. Astron. Soc., **272**, 210

Клочкова и Галазутдинов (Klochkova V.G., Galasutdinov G.A.), 1991, Preprint SAO N71

Клочкова и Панчук (Klochkova V.G., Panchuk V.E.), 1995, Mem. Soc. Astr. Ital., **66**, 333

Клочкова и Топильская (Klochkova V.G., Topilskaya G.P.), 1996, Bull. Spec. Astrophys. Obs., **41**, 52

Купка и др. (Kupka F., Piskunov N.E., Ryabchikova T.A., Stempels H.C., Weiss W.W.), 1999, Astron. Astrophys. Suppl. Ser., **138**, 119

Панчук В.Е., Ермаков С.В., 1999, Научно-технический отчет САО N267

Панчук и др. (Panchuk V.E., Najdenov I.D., Klochkova V.G., Ermakov S.V., Ivanchik A.V., Murzin V.A.), 1998, Bull. Spec. Astrophys. Obs., **44**, 127

Пискунов и др. (Piskunov N.E., Kupka F., Ryabchikova T.A., Weiss W.W., Jeffery C.S.), 1995, Astron. Astrophys. Suppl. Ser., **112**, 525

Рябчикова и др. (Ryabchikova T.A. Piskunov N.E., Stempels H.C., Kupka F., Weiss W.W.), 1999, Proc. of the 6th International Colloquium on Atomic Spectra and Oscillator Strengths, Victoria BC, Canada, 1998, Physica Scripta T83, 162

Хоффлейт и Уоррен (Hoffleit D., Warren Jr W.H.), 1991, The Bright Star Catalogue, 5th Revised Ed., Astronomical Data Center, NSSDC/ADC

Ченцов и др.(Chentsov E.L., Klochkova V.G., Mal'kova G.A.), 1997, Bull. Spec. Astrophys. Obs., **43**, 18

Ченцов и др.(Chentsov E.L., Klochkova V.G., Tavolganskaya N.S.), 1999, Bull. Spec. Astrophys. Obs., **48**, 25

Таблица 1: Список звезд, спектры которых приведены в атласе (Рис. 1-16). Спектральные классы и скорости вращения взяты из базы данных SIMBAD.

Star	HR	MK	V sin i, km/s
γ Vir	4825	F0V	30
ϕ Cas	382	F0Ia	27
σ Boo	5447	F2V	3
41 Cyg	7834	F5Iab	13
τ Boo	5185	F6IV	14
γ Ser	5933	F6IV	8
α UMi	424	F7:Ib-IIvar	17
99 Her	6775	F7V	3
θ Boo	5404	F7V	34
γ Cyg	7796	F8Iab	20
o Aql	7560	F8V	<6
HD 176051	7662	F9V	4
β Cam	1603	GIIb-II	19
η Boo	5235	G0IV	13
β CVn	4785	G0V	<3
α Sge	7479	G1II	0
24 Cep	8468	G7II-III	<19
μ Peg	8684	G8III	7
β Aql	7602	G8IV	<16
ξ Boo	5544	G8V	3

Таблица 2: Список звезд разной металличности, фрагменты спектров которых приведены на Рис. 17.

Star	MK	[Fe/H]
HD176051	F9V	0.0
G27-44	F8	-0.8
G188-22	F8	-1.2
BD+36 2165	G0	-1.5
BD-15 2546	F6	-1.8
G201-5	F6	-2.0
HD140283	F3	-2.3

Таблица 3: Список линий различных элементов, отмеченных в атласе (Рис. 1–16, 17). Обозначения: λ – длина волны в Å, El/Ion – элемент и стадия ионизации, gf – сила осциллятора, EP_{low} – энергия возбуждения нижнего уровня в электронвольтах.

λ	El/Ion	log gf	EP_{low}	λ	El/Ion	log gf	EP_{low}
4549.617	Ti 2	-0.220	1.584	5526.790	Sc 2	0.024	1.768
4629.339	Fe 2	-2.330	2.807	5528.405	Mg 1	-0.620	4.346
4654.605	Fe 1	-1.077	3.602	5569.618	Fe 1	-0.486	3.417
4691.412	Fe 1	-1.523	2.990	5572.842	Fe 1	-0.275	3.396
4702.991	Mg 1	-0.666	4.346	5576.089	Fe 1	-1.000	3.430
4731.470	Fe 2	-3.518	10.737	5588.749	Ca 1	0.313	2.526
4779.985	Ti 2	-1.260	2.048	5590.114	Ca 1	-0.596	2.521
4805.085	Ti 2	-0.960	2.061	5594.462	Ca 1	0.051	2.523
4810.528	Zn 1	-0.137	4.078	5598.480	Ca 1	-0.134	2.521
4825.478	Nd 2	-0.776	0.182	5601.277	Ca 1	-0.552	2.52
4836.213	Cr 2	-2.008	10.505	5645.613	Si 1	-2.140	4.930
4861.323	H 1	-0.020	10.199	5669.042	Sc 2	-1.200	1.500
4883.684	Y 2	0.070	1.084	5682.633	Na 1	-0.700	2.102
4900.120	Y 2	-0.090	1.033	5688.205	Na 1	-0.450	2.104
4923.927	Fe 2	-1.320	2.891	5715.066	Ni 1	-0.352	4.088
4934.076	Ba 2	-0.150	0.000	5772.146	Si 1	-1.750	5.082
4966.089	Fe 1	-0.871	3.332	5816.061	Fe 1	-2.300	4.294
4980.166	Ni 1	0.070	3.606	5853.668	Ba 2	-1.000	0.604
5018.440	Fe 2	-1.220	2.891	5857.451	Ca 1	0.257	2.933
5031.021	Sc 2	-0.400	1.357	5889.951	Na 1	0.117	0.000
5074.748	Fe 1	-0.200	4.220	5895.924	Na 1	-0.184	0.000
5087.416	Y 2	-0.170	1.084	5991.376	Fe 2	-3.540	3.153
5092.794	Nd 2	-0.609	0.380	6013.513	Mn 1	-0.251	3.072
5112.297	Zr 2	-0.590	1.665	6016.673	Mn 1	-0.216	3.073
5129.152	Ti 2	-1.300	1.892	6021.819	Mn 1	0.034	3.075
5169.033	Fe 2	-1.303	2.891	6039.722	V 1	-0.650	1.064
5167.321	Mg 1	-1.030	2.709	6046.027	S 1	-1.030	7.868
5172.684	Mg 1	-0.402	2.712	6052.674	S 1	-0.740	7.870
5183.604	Mg 1	-0.180	2.717	6084.111	Fe 2	-3.780	3.199
5200.406	Y 2	-0.570	0.992	6122.217	Ca 1	-0.386	1.886
5237.329	Cr 2	-0.582	10.760	6141.713	Ba 2	-0.076	0.704
5239.813	Sc 2	-0.765	1.455	6162.173	Ca 1	-0.167	1.899
5276.002	Fe 2	-1.940	3.199	6191.558	Fe 1	-1.417	2.433
5281.790	Fe 1	-0.834	3.038	6252.555	Fe 1	-1.687	2.404
5324.179	Fe 1	-0.103	3.211	6254.258	Fe 1	-2.443	2.279
5325.553	Fe 2	-3.120	3.221	6256.361	Fe 1	-2.408	2.453
5336.771	Ti 2	-1.630	1.582	6347.109	Si 2	0.297	8.121
5367.467	Fe 1	0.443	4.415	6371.371	Si 2	-0.003	8.121
5407.604	Cr 2	-2.151	3.827	6416.919	Fe 2	-2.650	3.892
5414.073	Fe 2	-3.540	3.221	6432.680	Fe 2	-1.059	10.930
5425.257	Fe 2	-3.160	3.199	6439.075	Ca 1	0.394	2.526
5449.223	Nd 2	-0.829	1.264	6496.897	Ba 2	-0.377	0.604
5468.371	Ce 2	-0.390	1.402	6562.797	H 1	0.710	10.199
5509.895	Y 2	-1.010	0.992	6604.601	Sc 2	-1.309	1.357

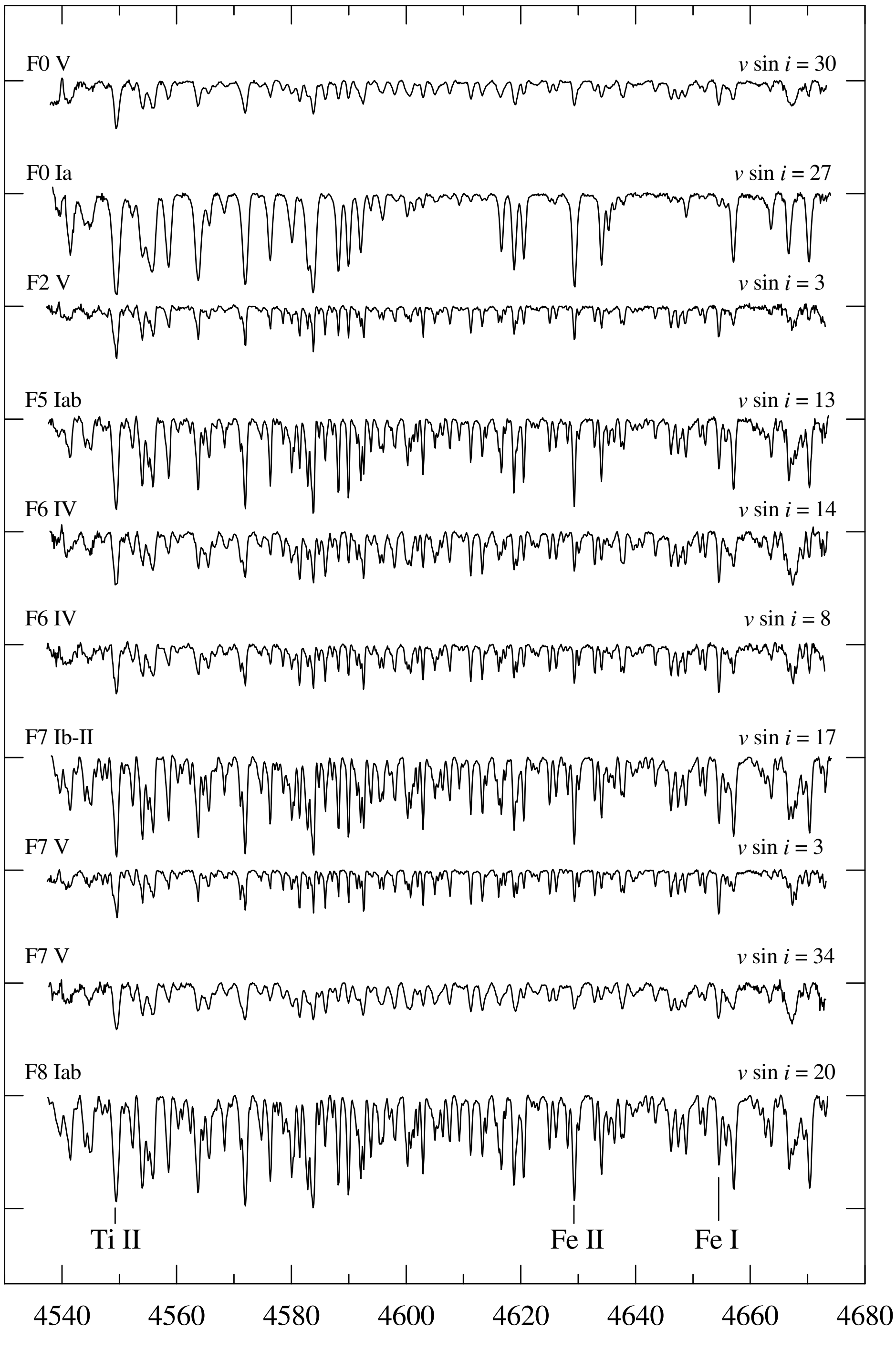

Рис. 1: (a) – Эшелле-порядок m=51 спектров первой половины звезд из Таб. 1. Указаны спектральный класс и значение проекции скорости осевого вращения, а также отмечены некоторые линии, информация о которых приведена в Таб. 3.

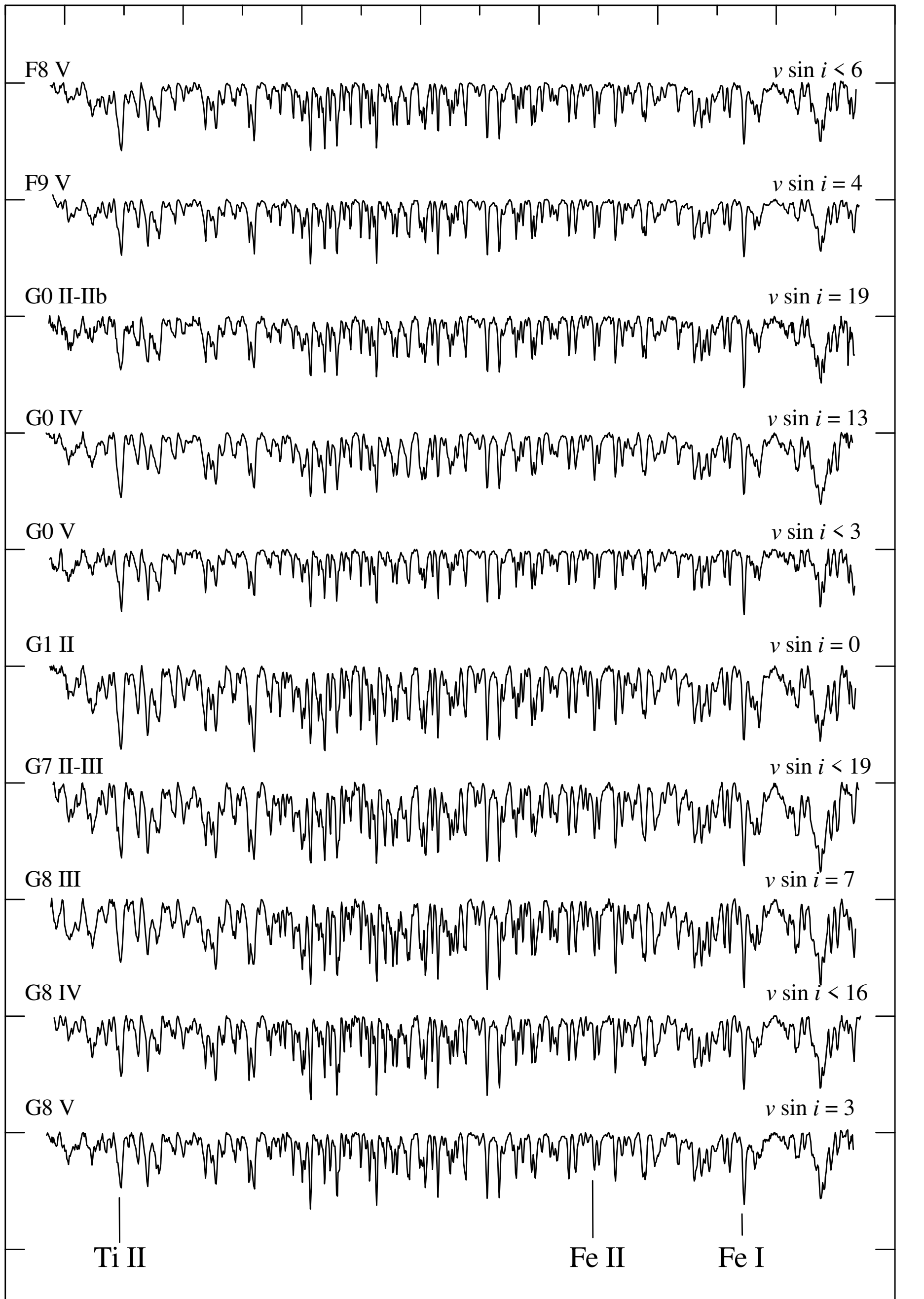

Рис. 1: (b) – Эшелле-порядок m=51 спектров второй половины звезд из Таб. 1.

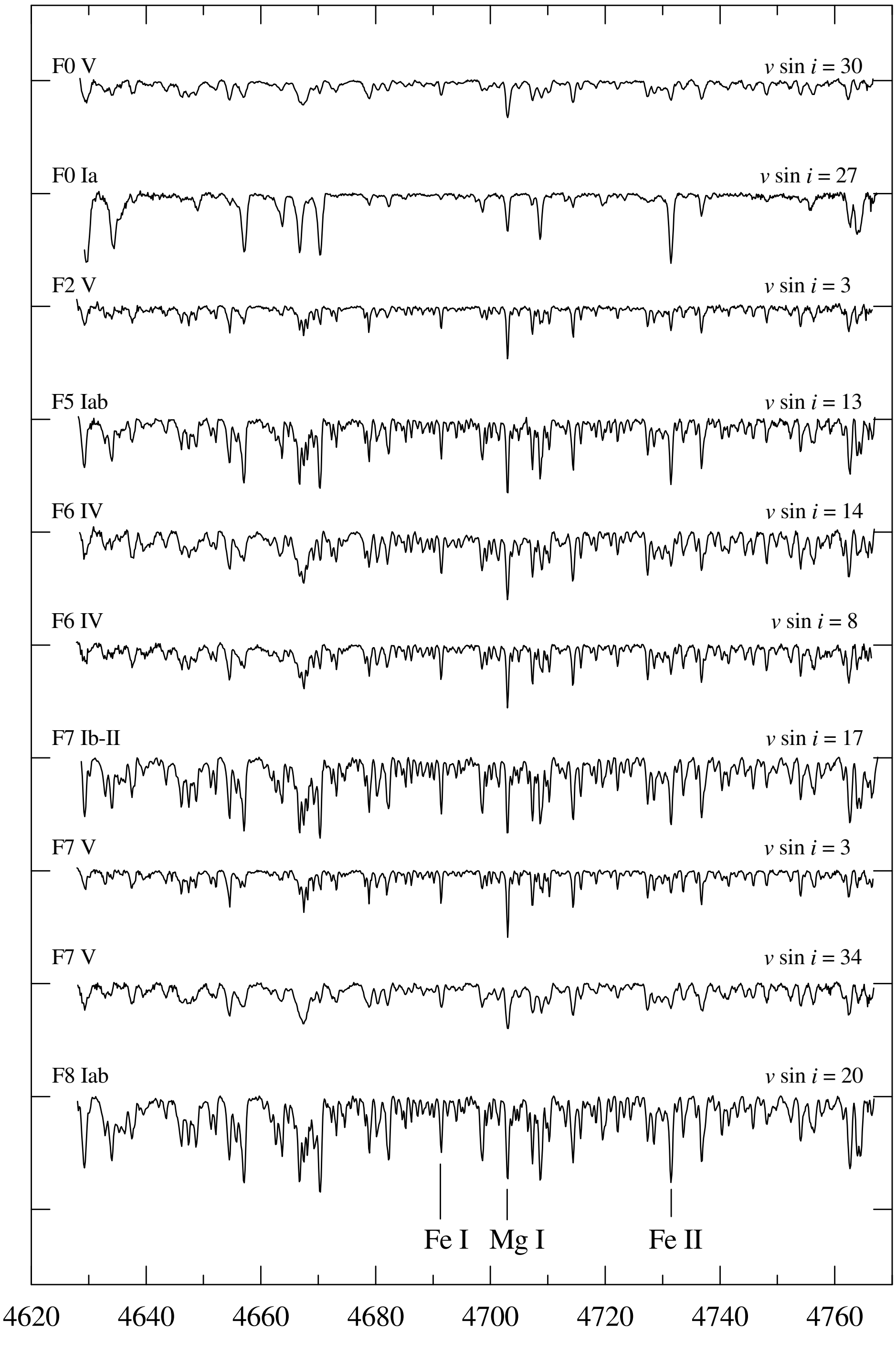

Рис. 2: (а) То же, что на Рис. 1 (а), для эшелле-порядка m=50.

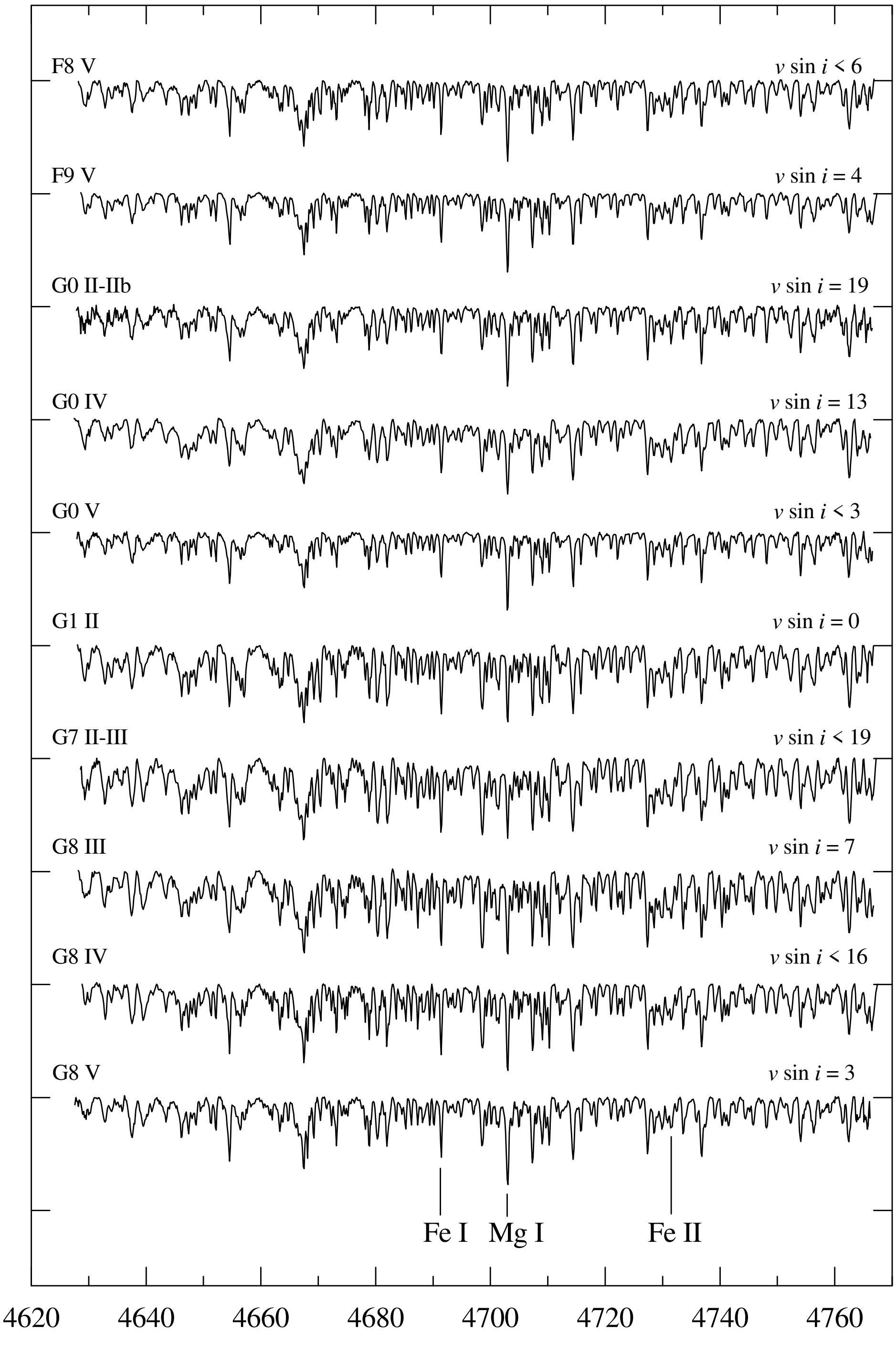

Рис. 2: (b) То же, что на Рис. 1 (b), для эшелле-порядка m=50

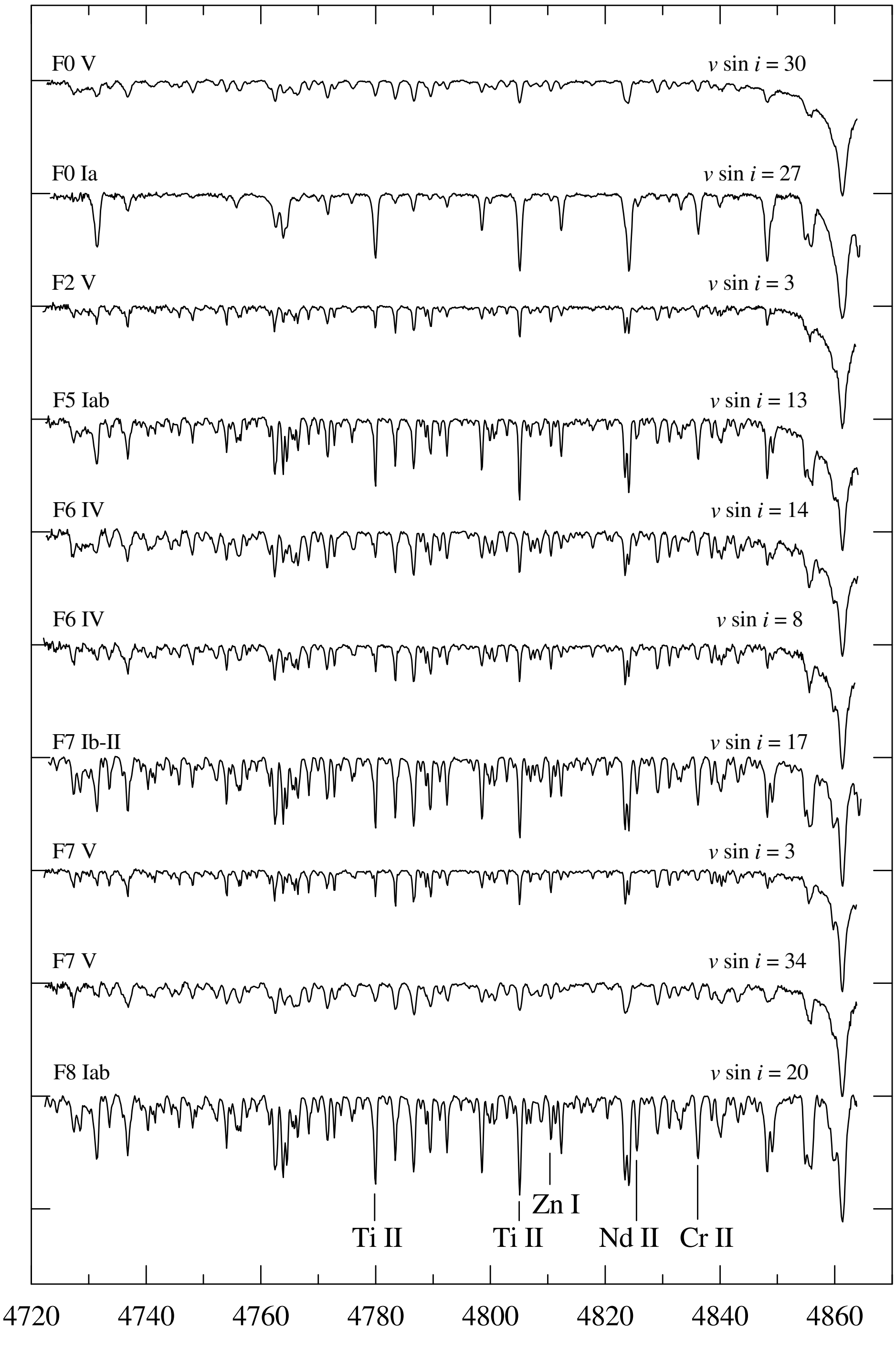

Рис. 3: (a) То же, что на Рис. 1 (a), для эшелле-порядка m=49.

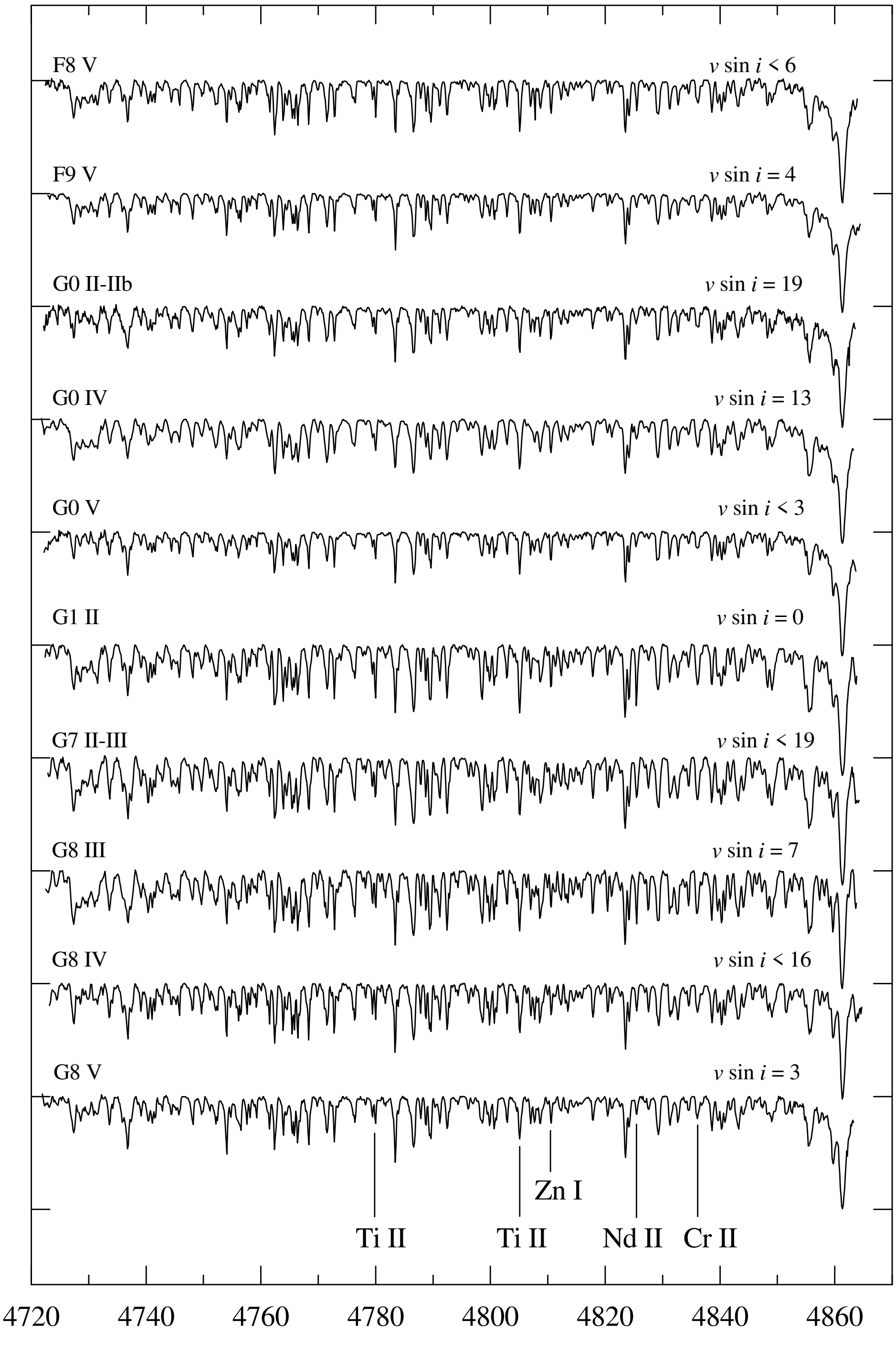

Рис. 3: (b) То же, что на Рис. 1 (b), для эшелле-порядка m=49

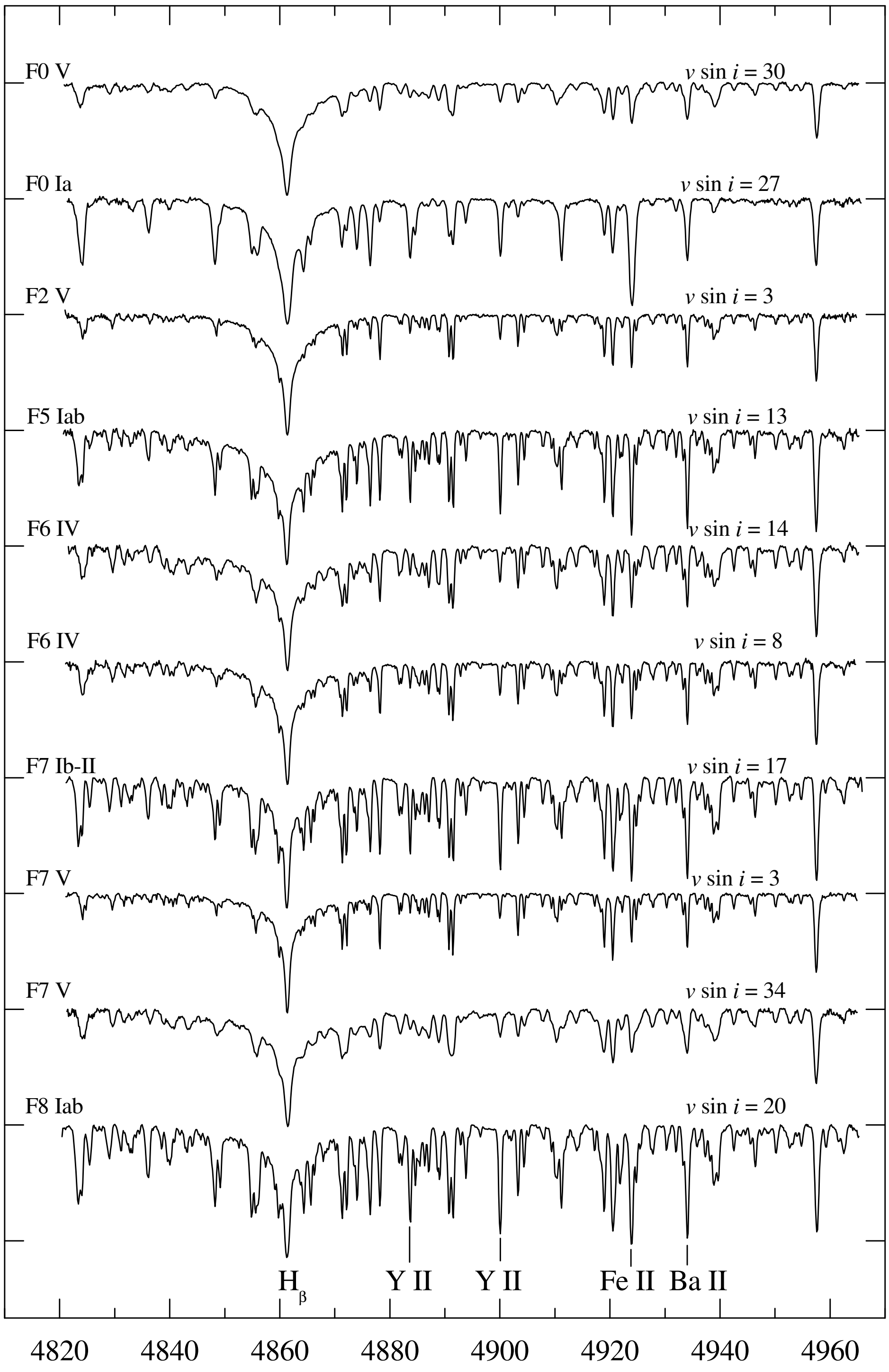

Рис. 4: (a) То же, что на Рис. 1 (a), для эшелле-порядка m=48.

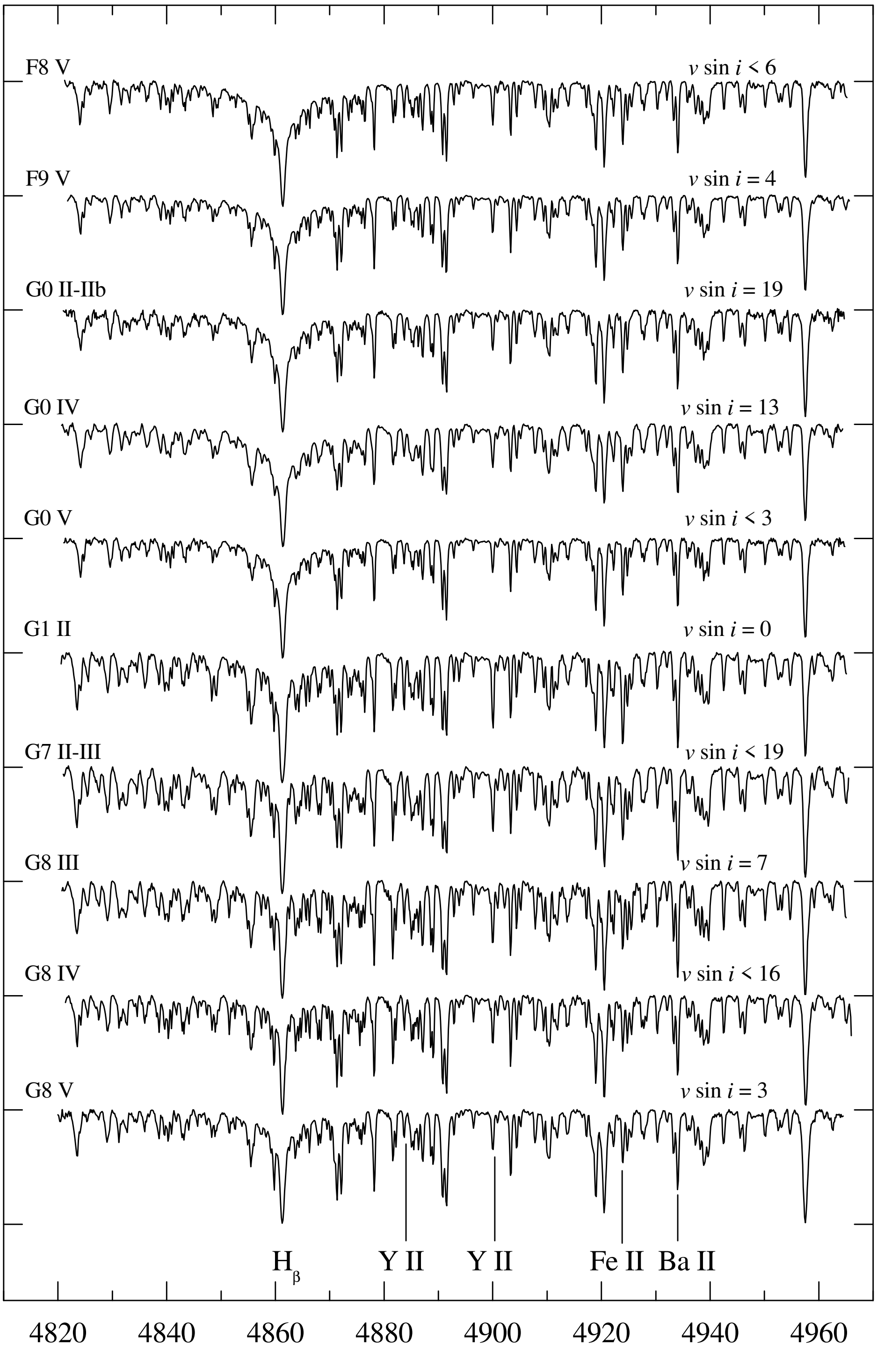

Рис. 4: (b) То же, что на Рис. 1 (b), для эшелле-порядка m=48.

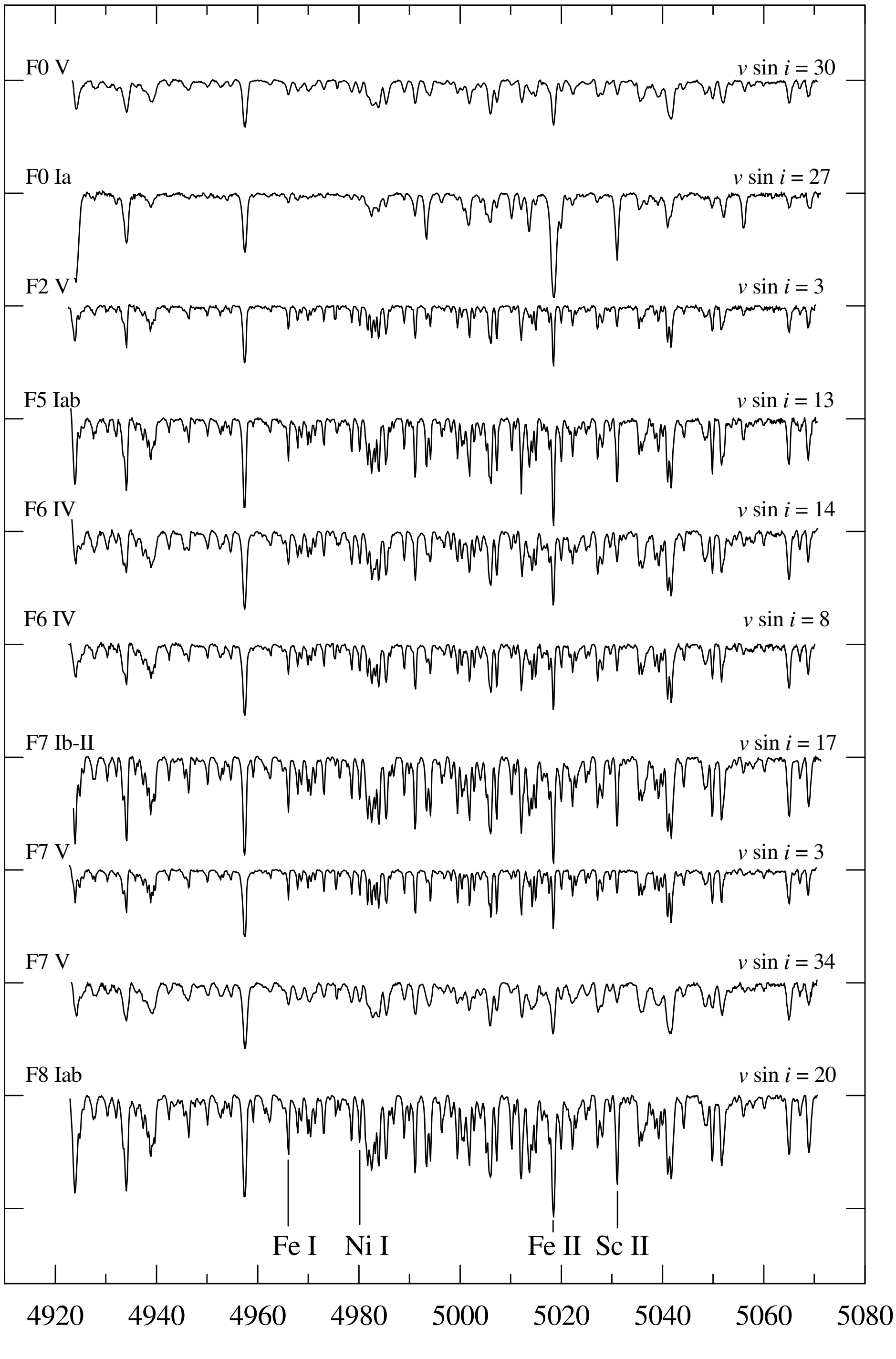

Рис. 5: (a) То же, что на Рис. 1 (a), для эшелле-порядка m=47.

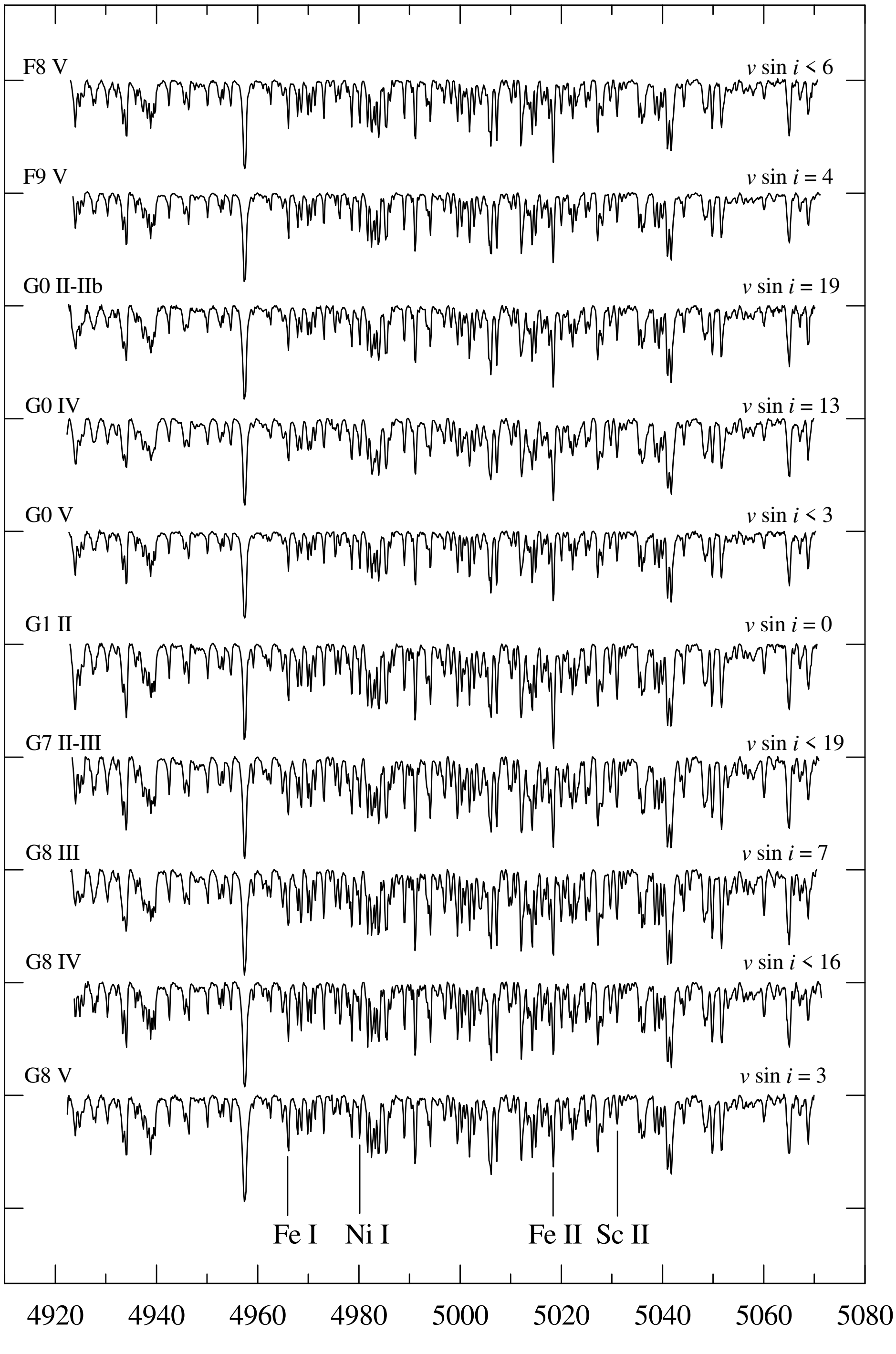

Рис. 5: (b) То же, что на Рис. 1 (b), для эшелле-порядка m=47.

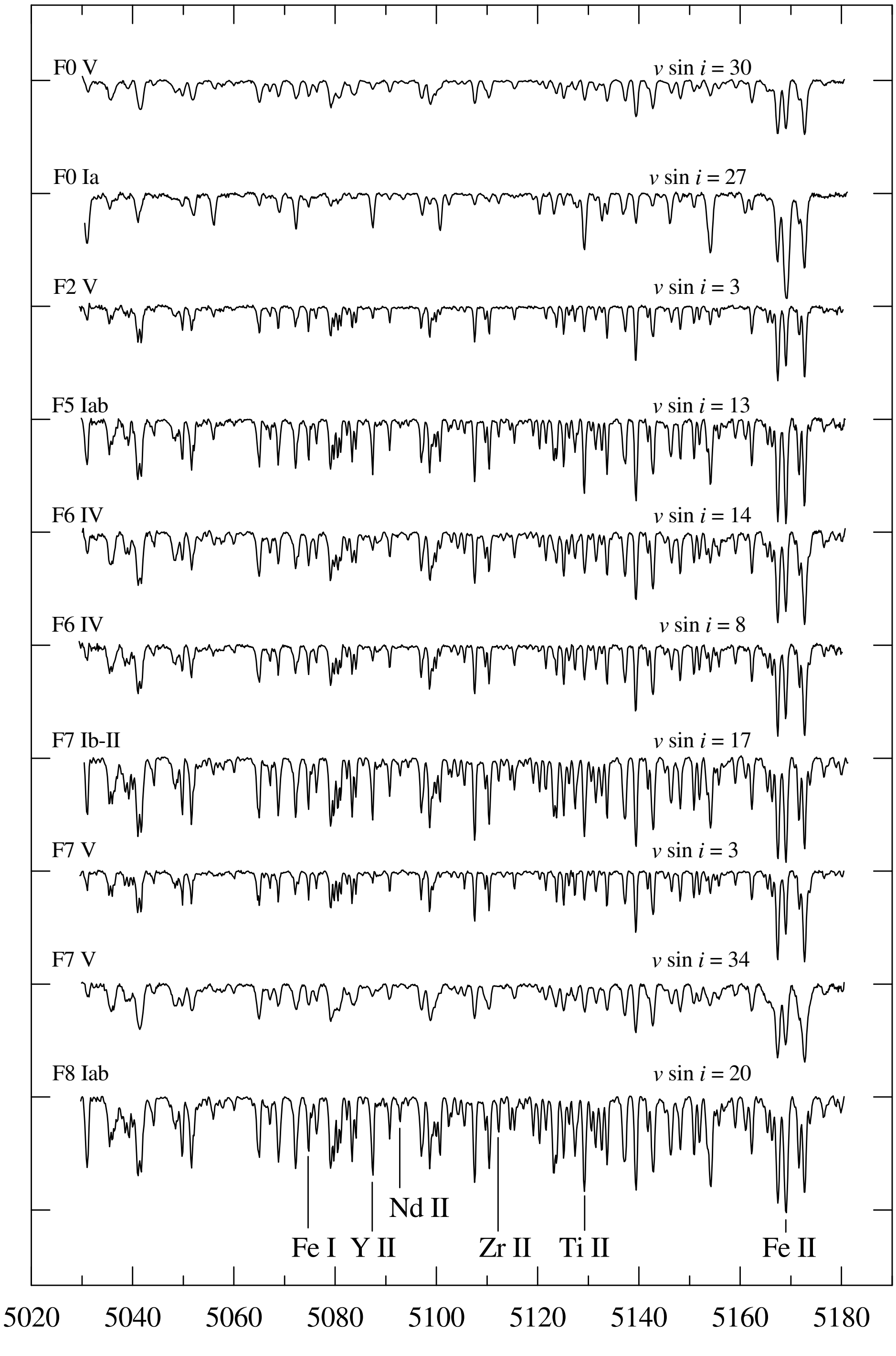

Рис. 6: (a) То же, что на Рис. 1 (a), для эшелле-порядка m=46.

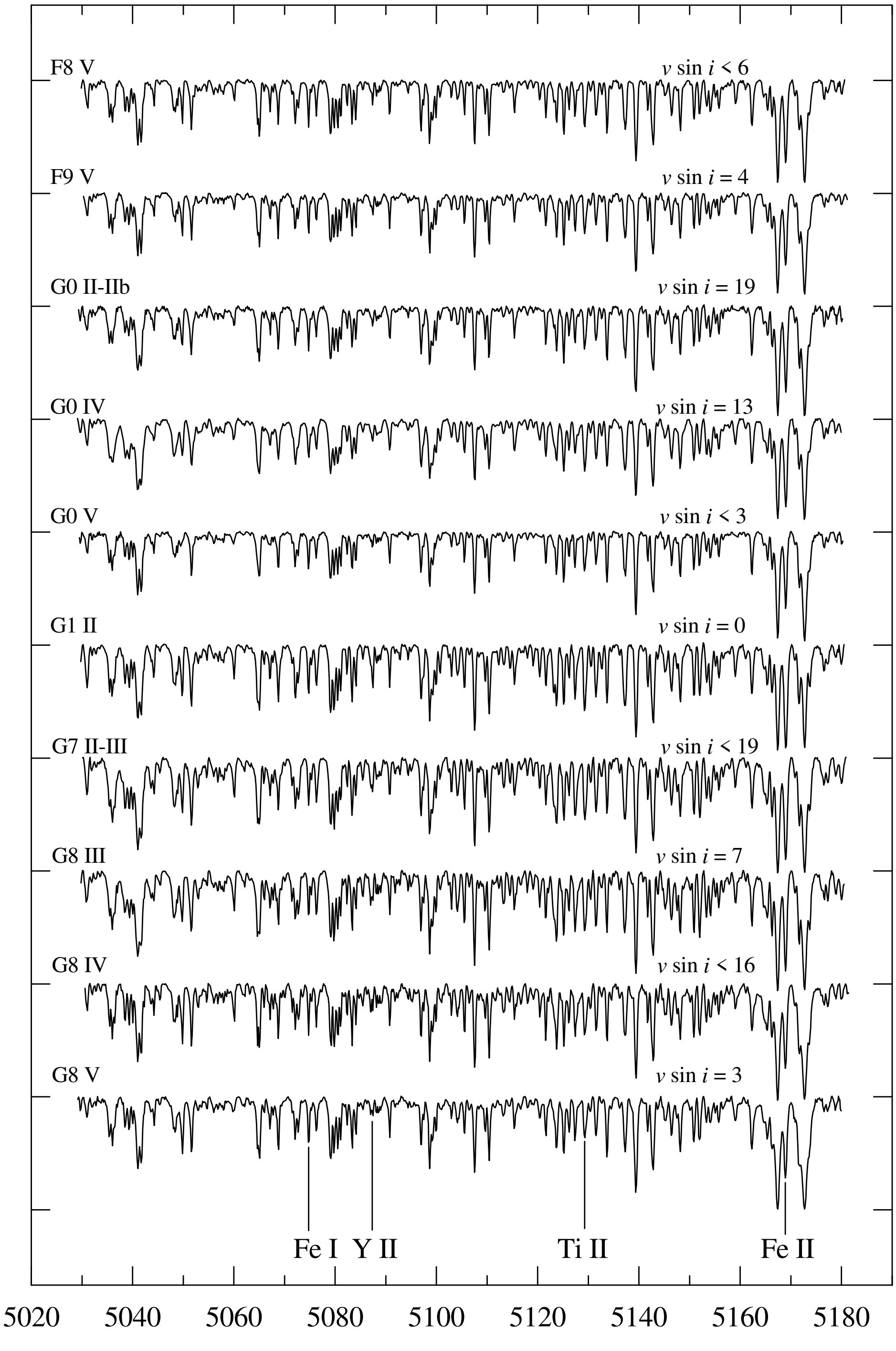

Рис. 6: (b) То же, что на Рис. 1 (b), для эшелле-порядка m=46.

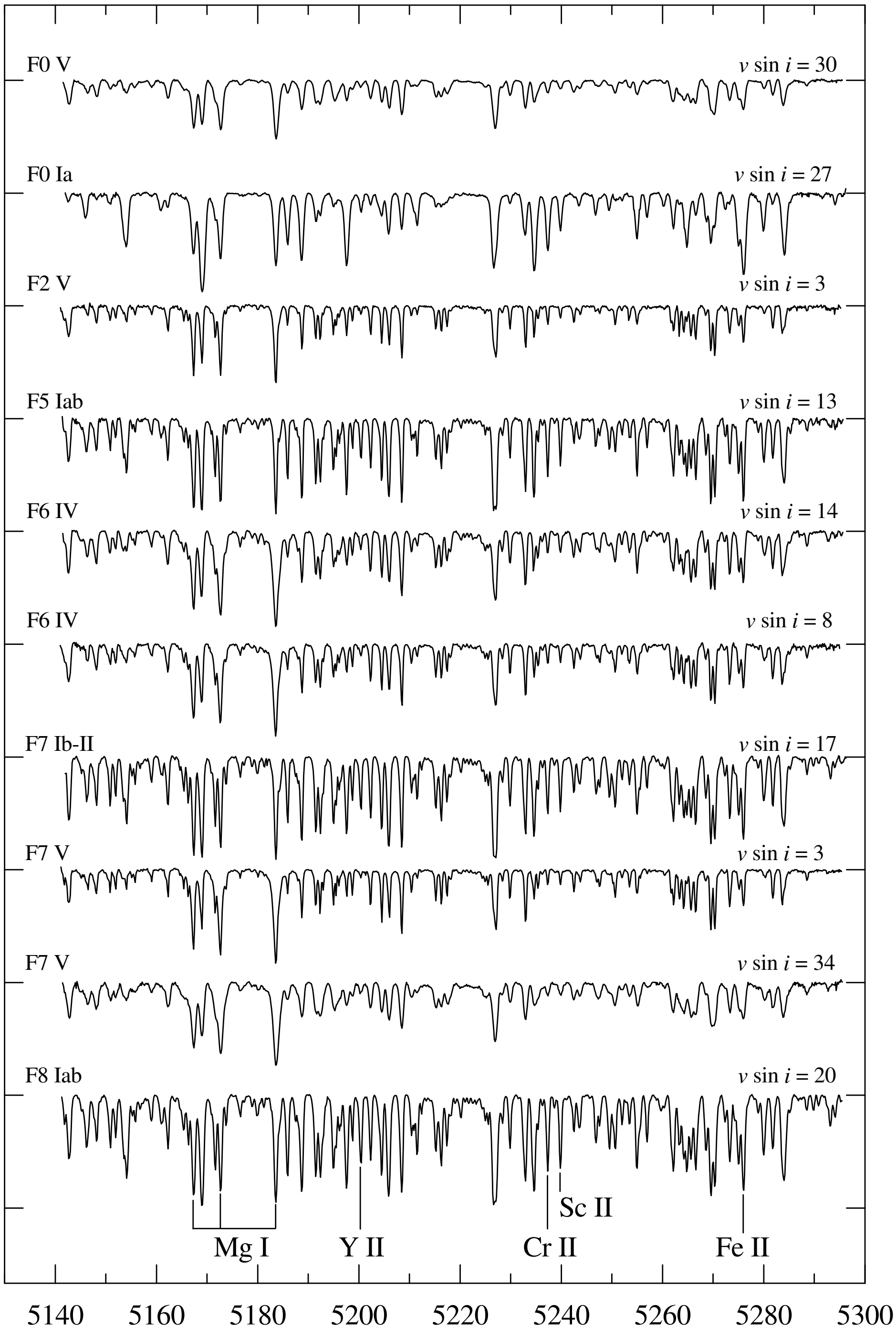

Рис. 7: (a) То же, что на Рис. 1 (a), для эшелле-порядка m=45.

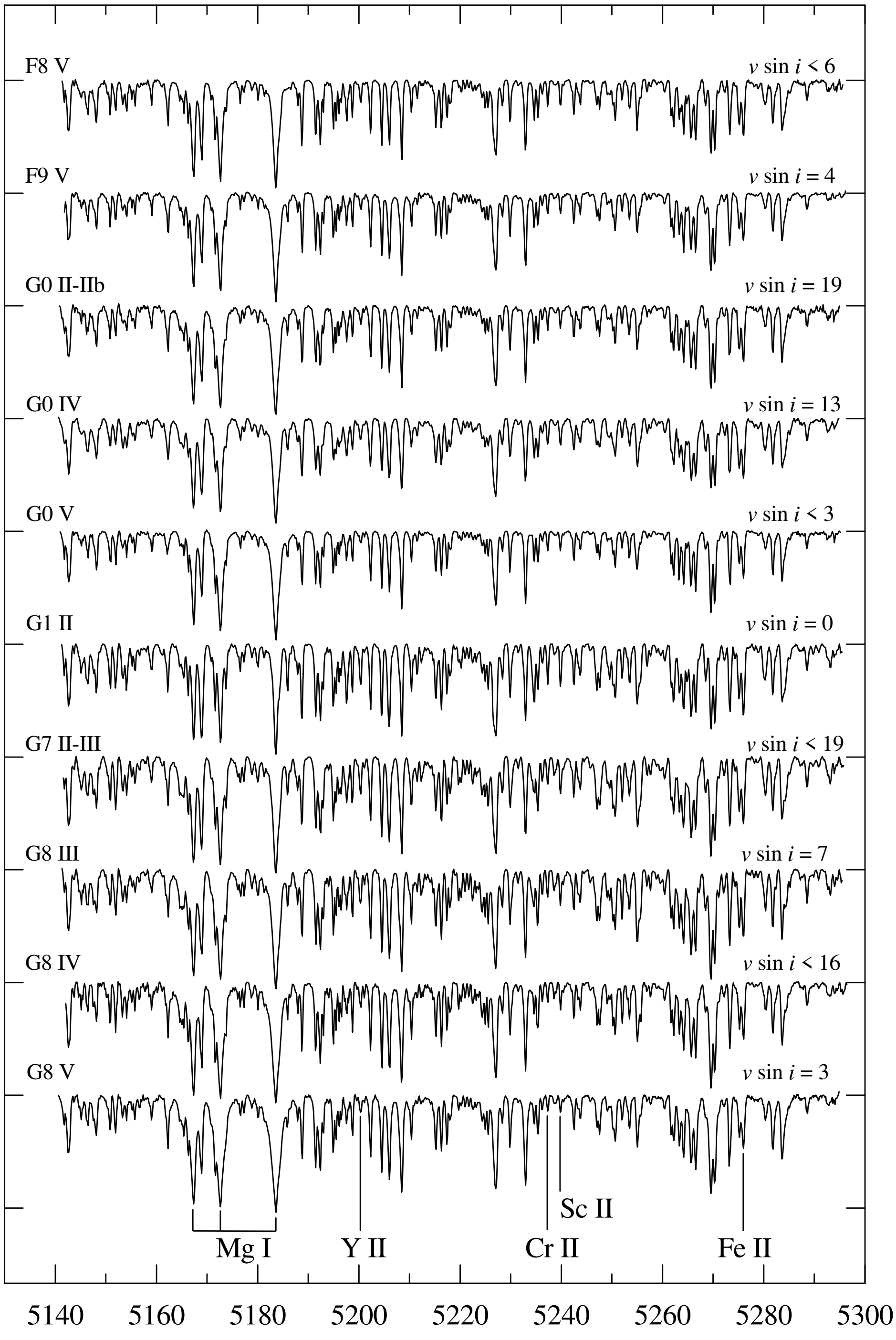

Рис. 7: (b) То же, что на Рис. 1 (b), для эшелле-порядка m=45.

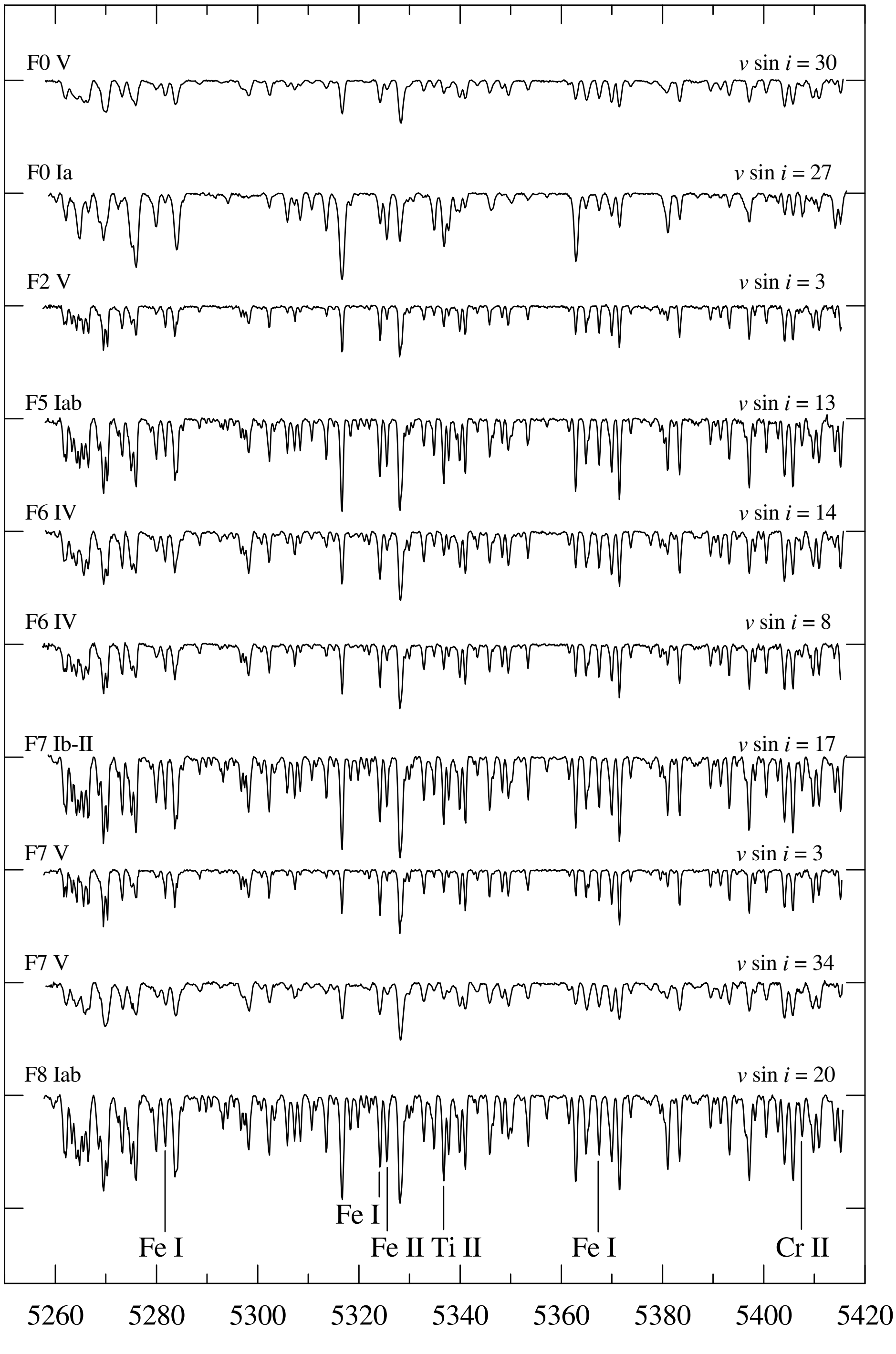

Рис. 8: (a) То же, что на Рис. 1 (a), для эшелле-порядка m=44.

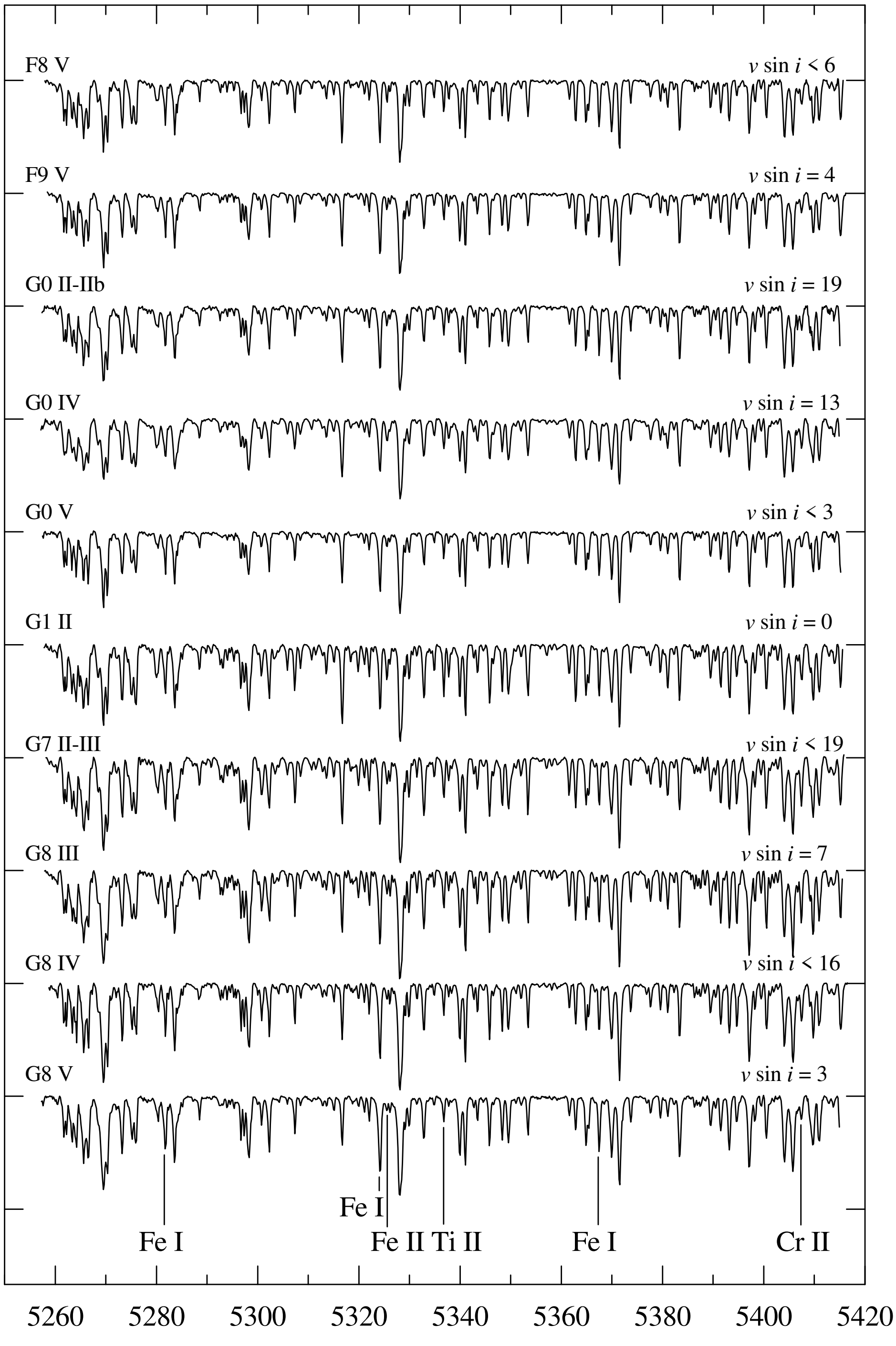

Рис. 8: (b) То же, что на Рис. 1 (b), для эшелле-порядка m=44.

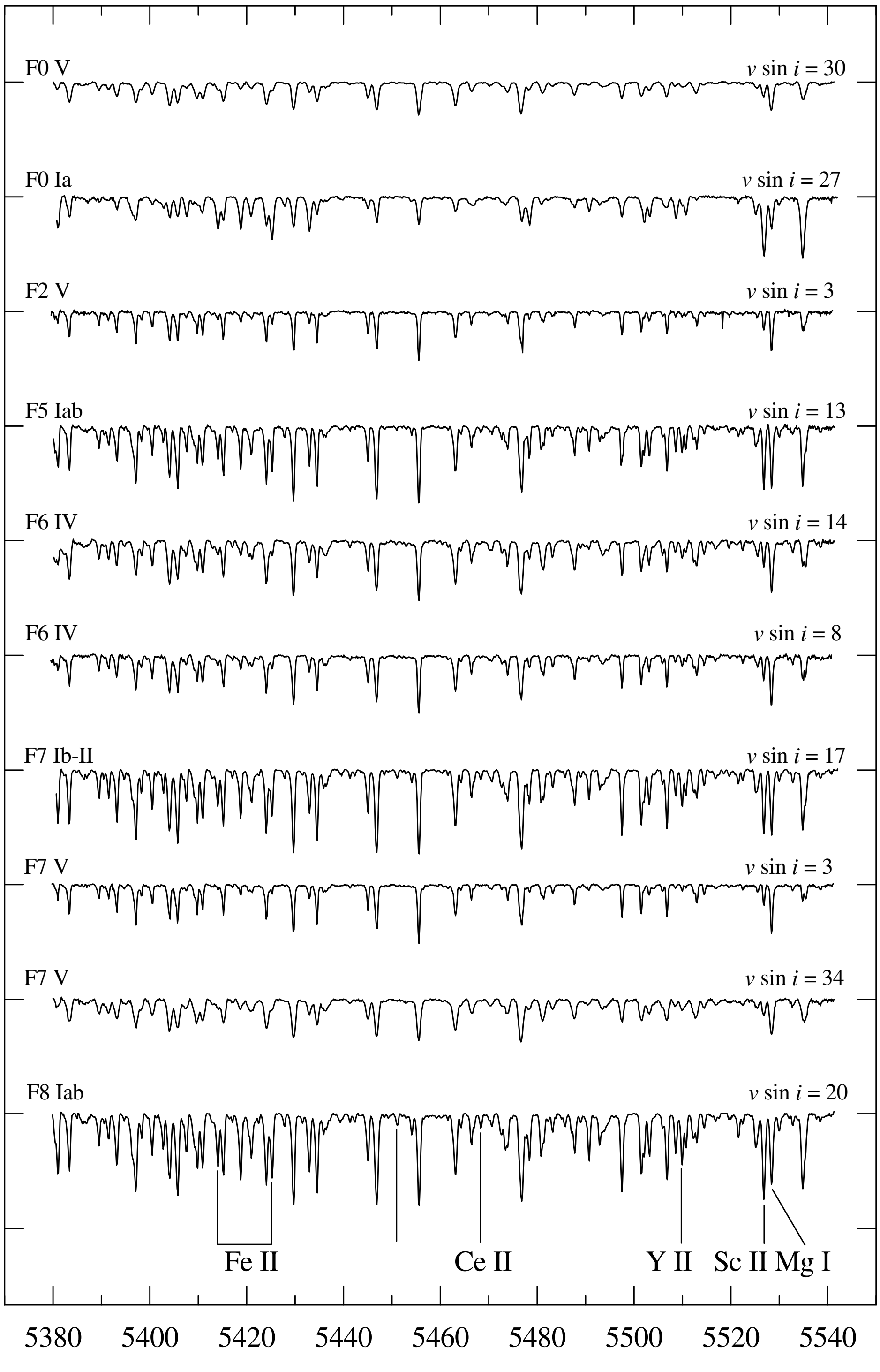

Рис. 9: (a) То же, что на Рис. 1 (a), для эшелле-порядка m=43.

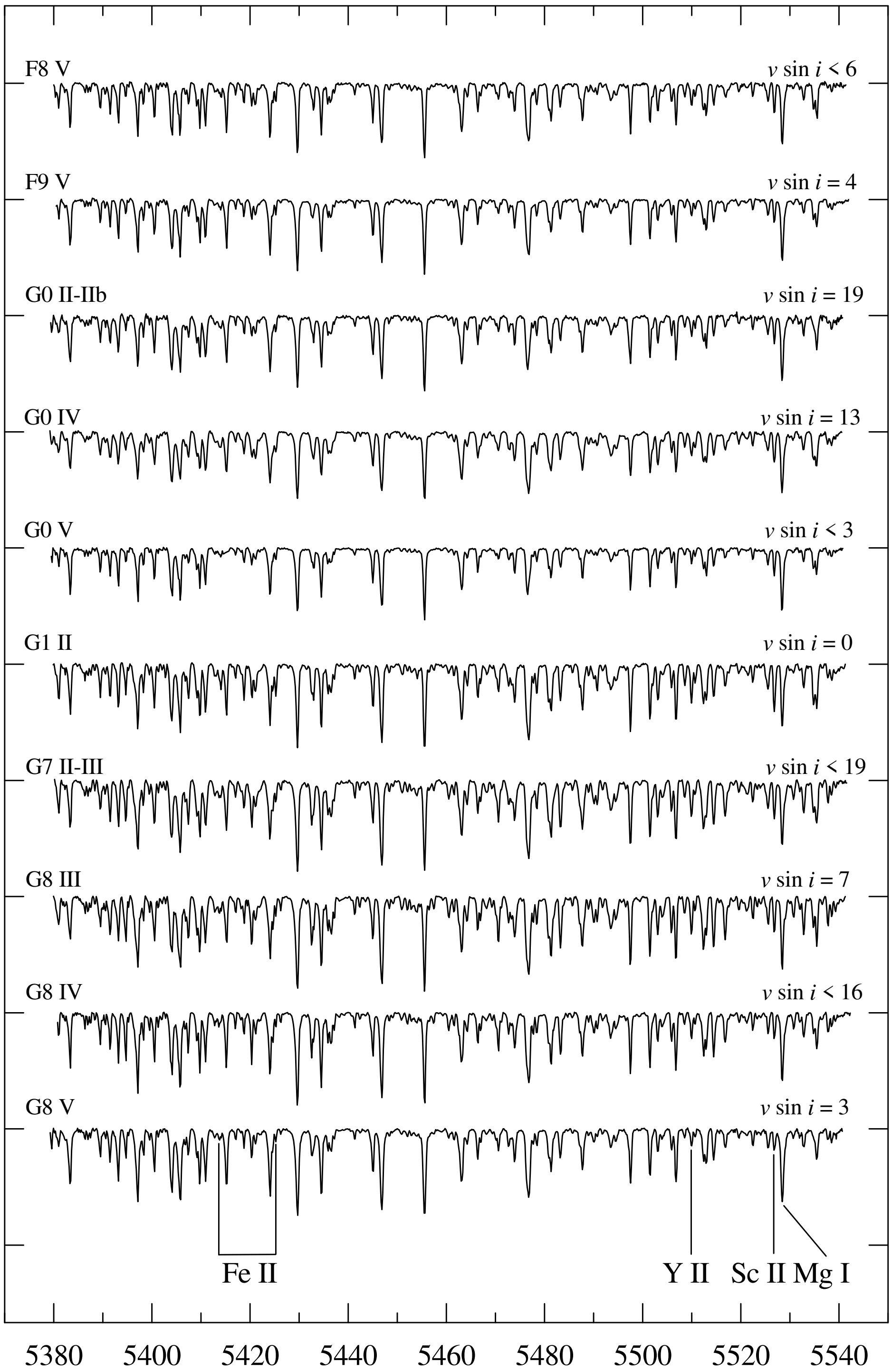

Рис. 9: (b) То же, что на Рис. 1 (b), для эшелле-порядка m=43.

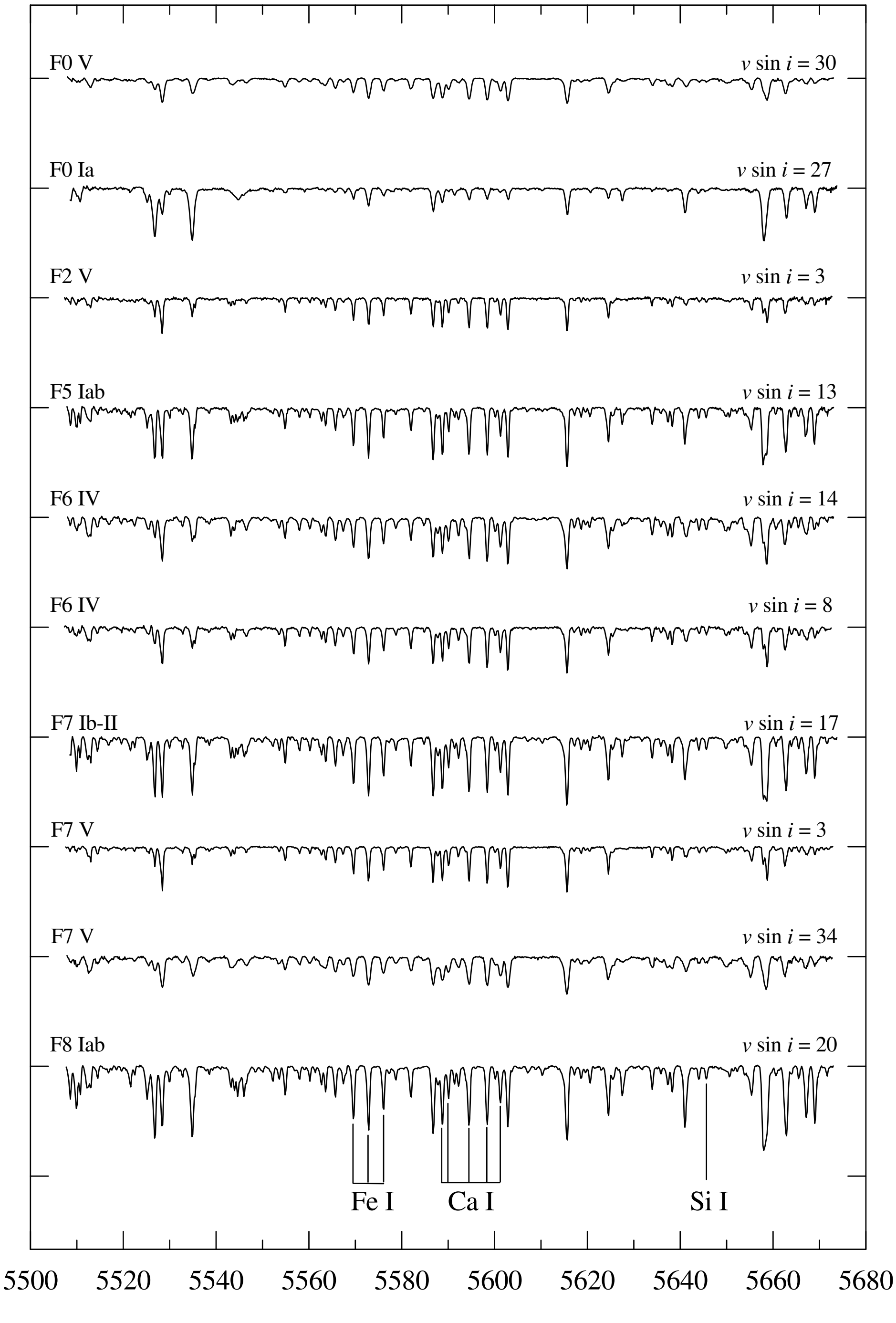

Рис. 10: (a) То же, что на Рис. 1 (a), для эшелле-порядка m=42.

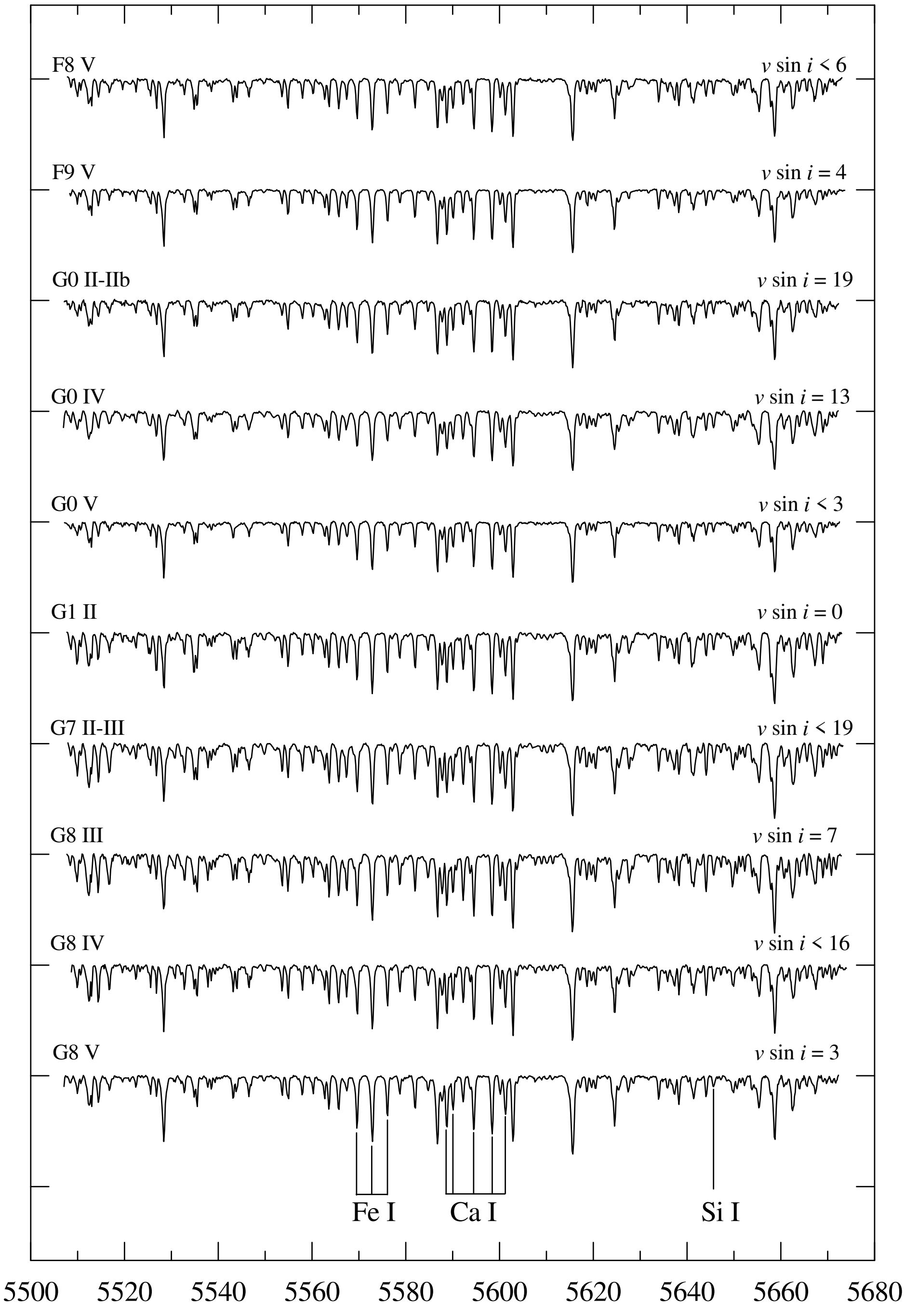

Рис. 10: (b) То же, что на Рис. 1 (b), для эшелле-порядка m=42.

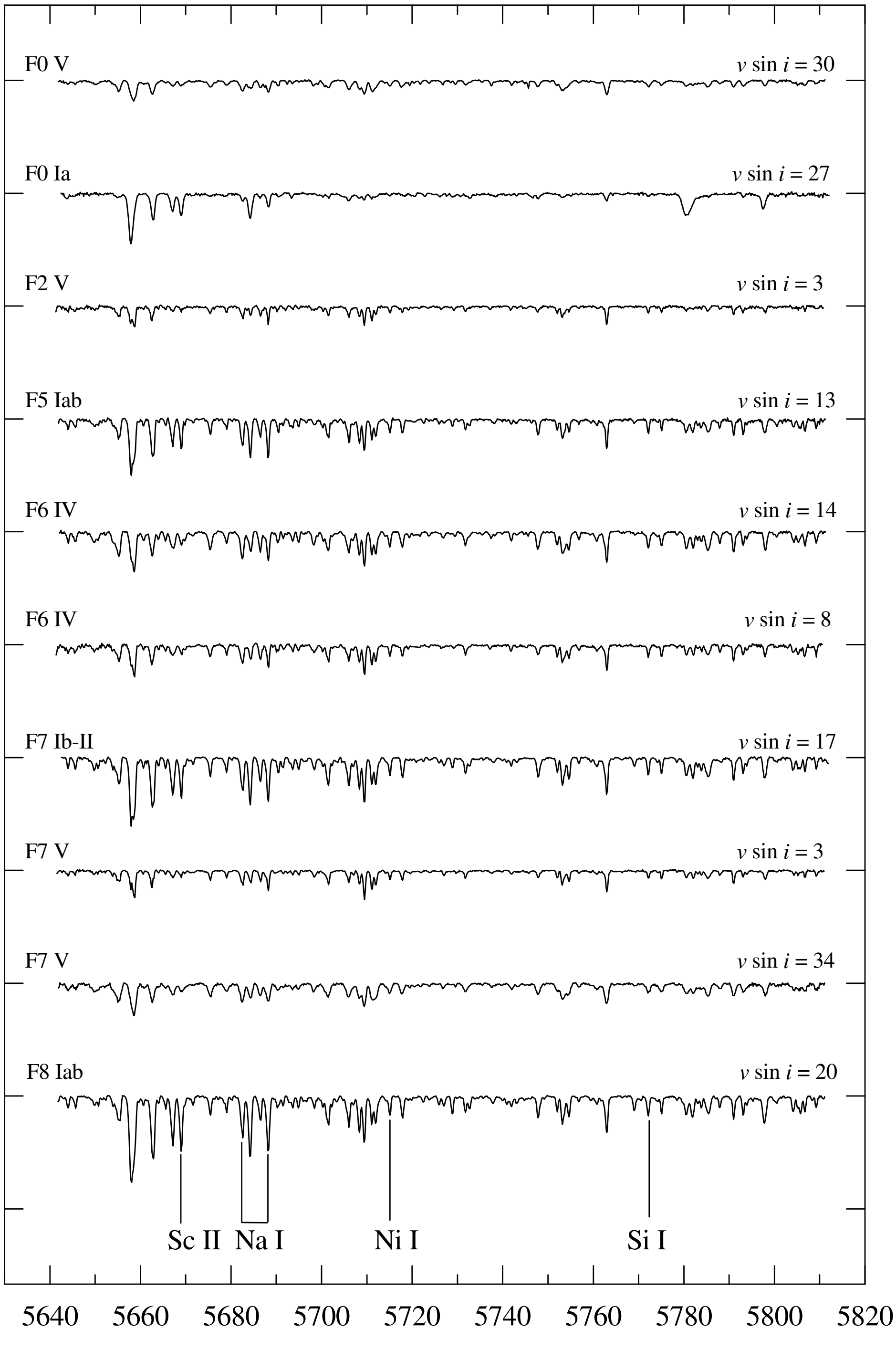

Рис. 11: (a) То же, что на Рис. 1 (a), для эшелле-порядка m=41.

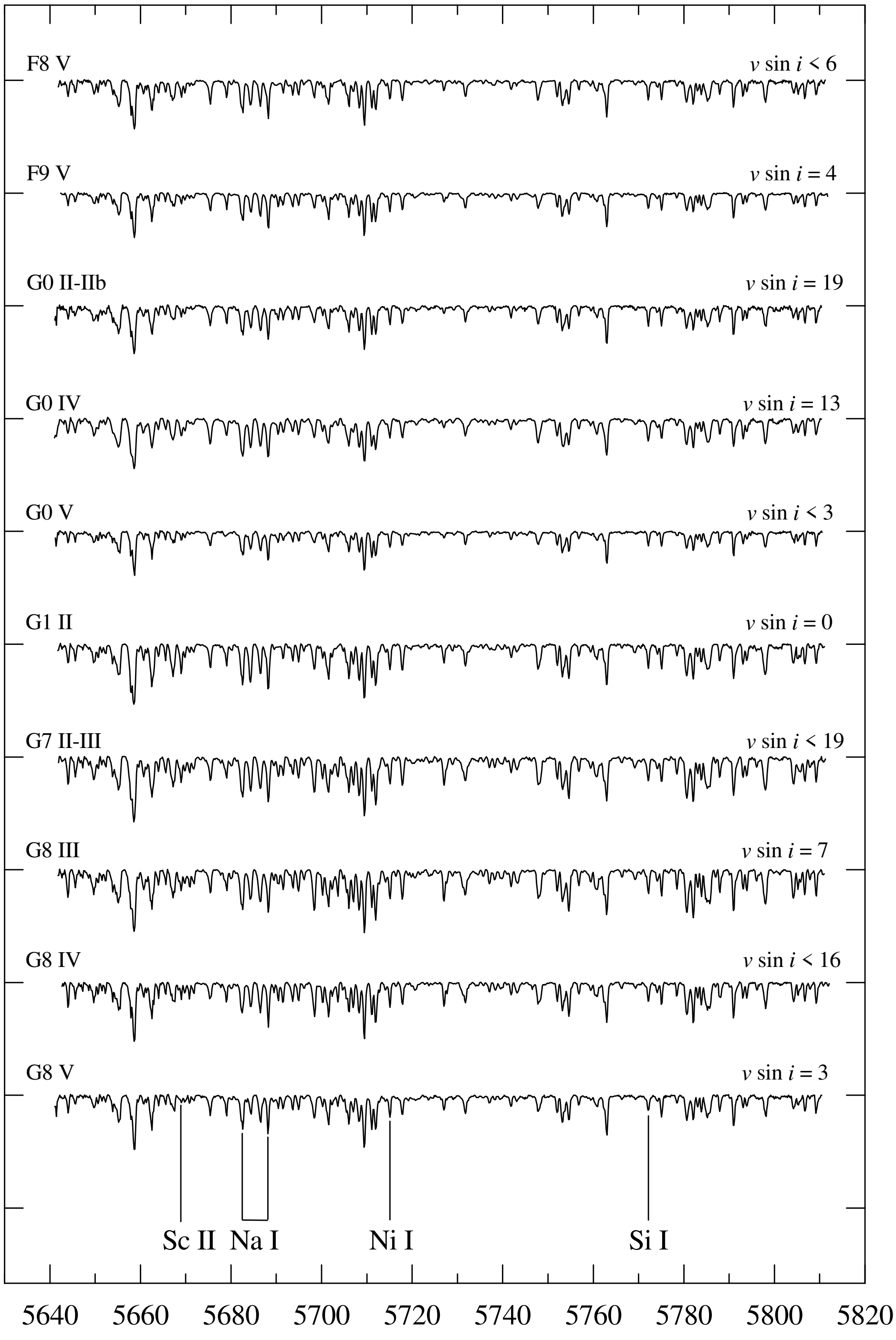

Рис. 11: (b) То же, что на Рис. 1 (b), для эшелле-порядка m=41.

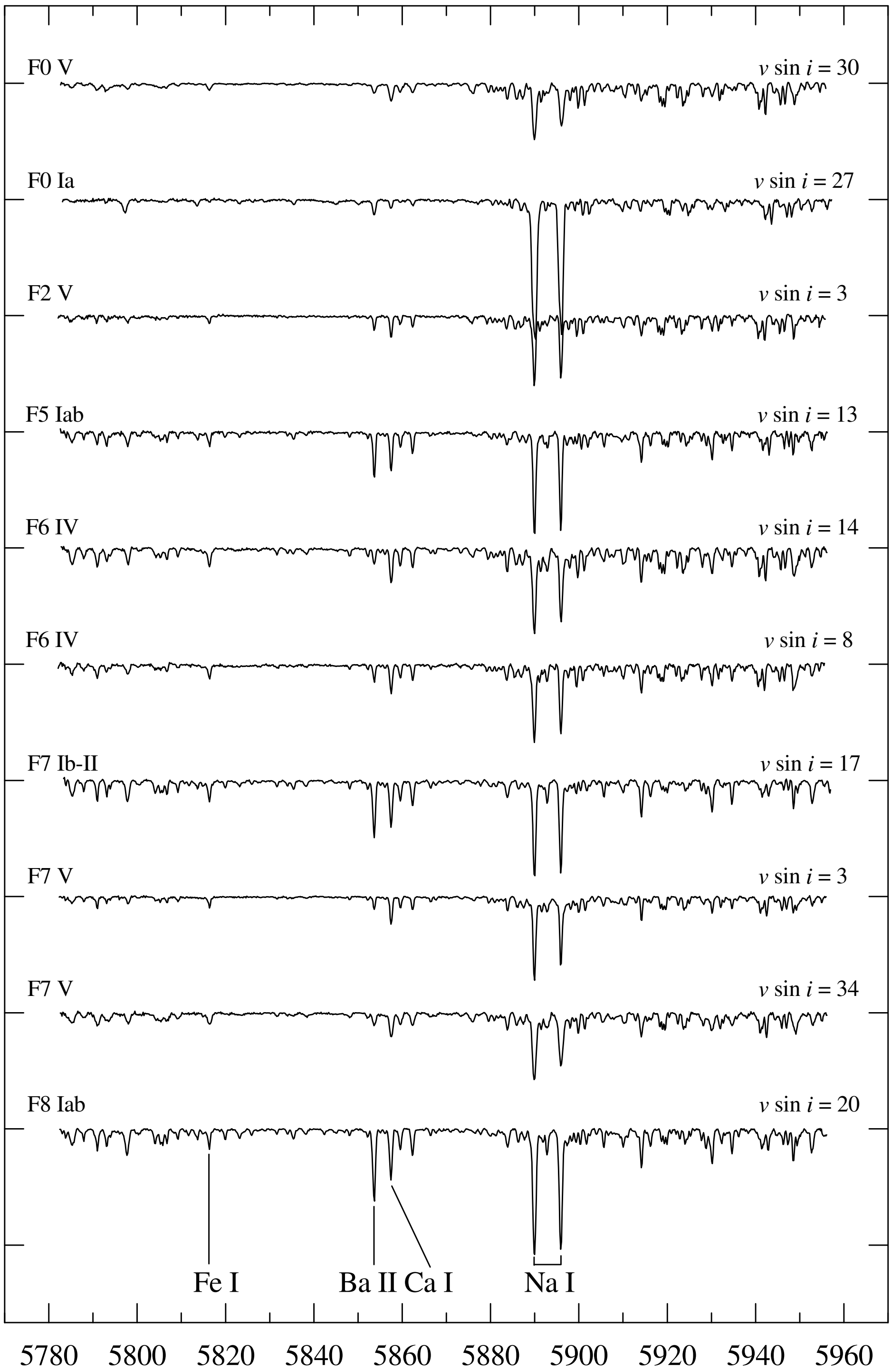

Рис. 12: (a) То же, что на Рис. 1 (a), для эшелле-порядка m=40.

Рис. 12: (b) То же, что на Рис. 1 (b), для эшелле-порядка m=40.

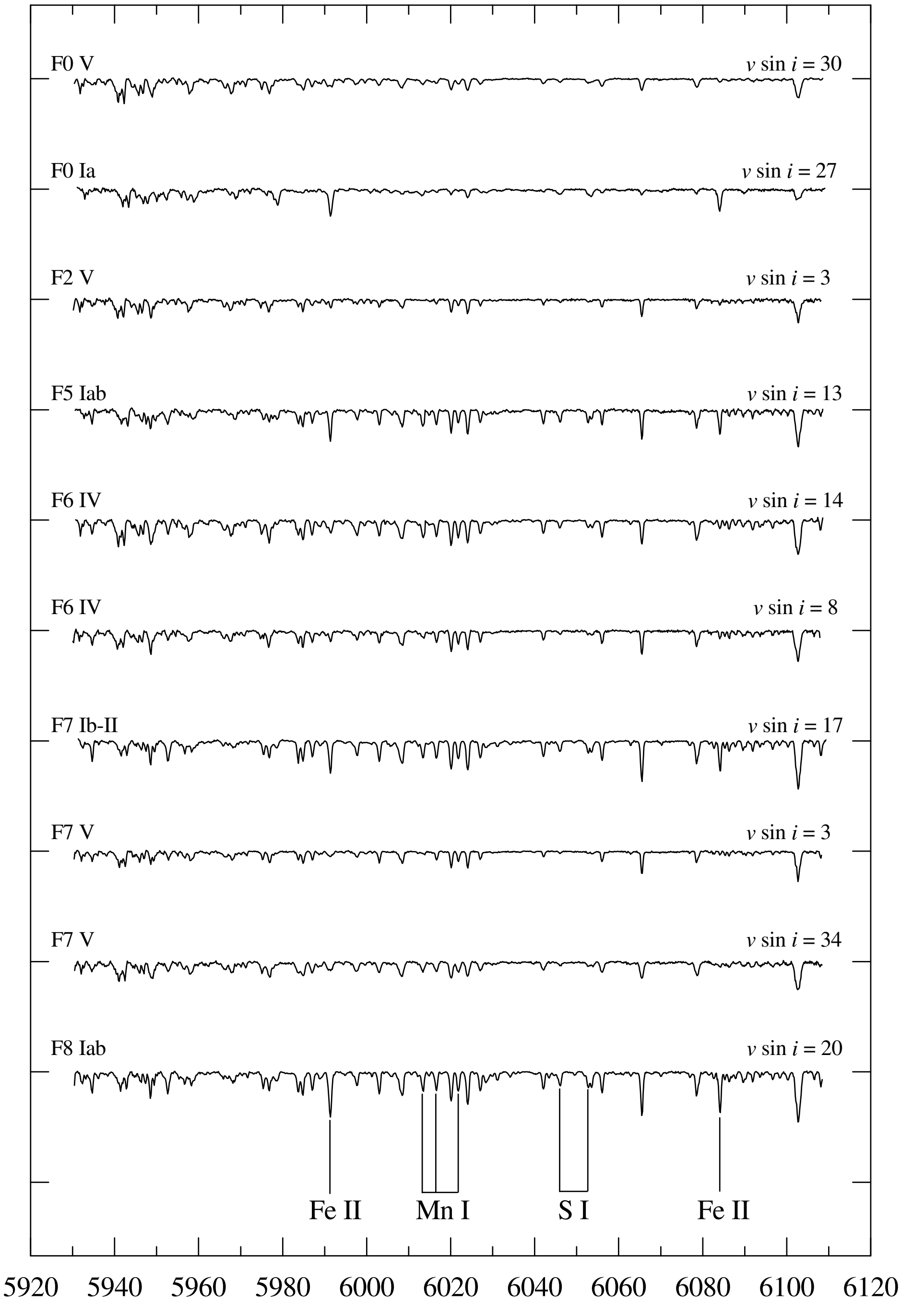

Рис. 13: (a) То же, что на Рис. 1 (a), для эшелле-порядка m=39.

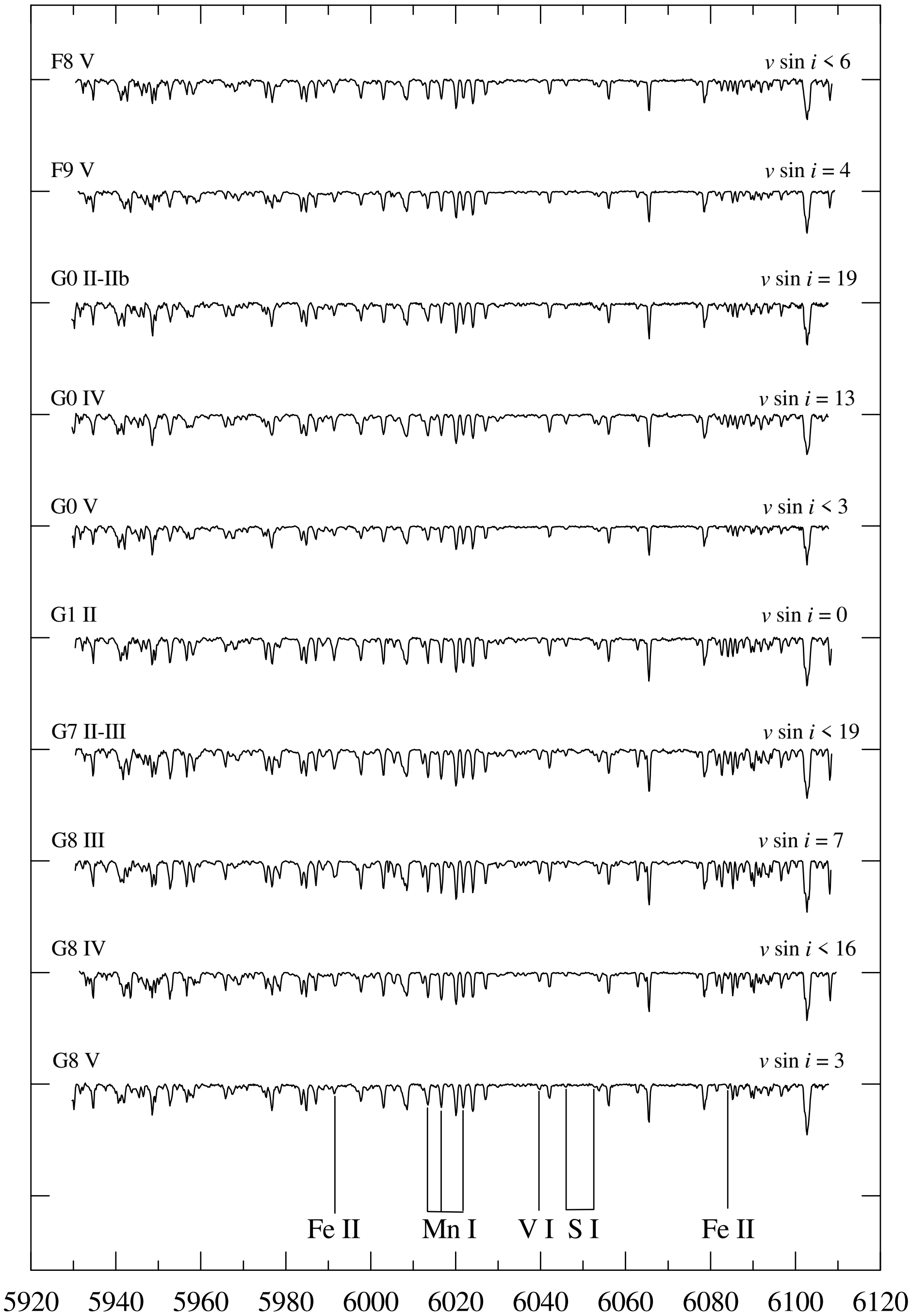

Рис. 13: (b) То же, что на Рис. 1 (b), для эшелле-порядка m=39.

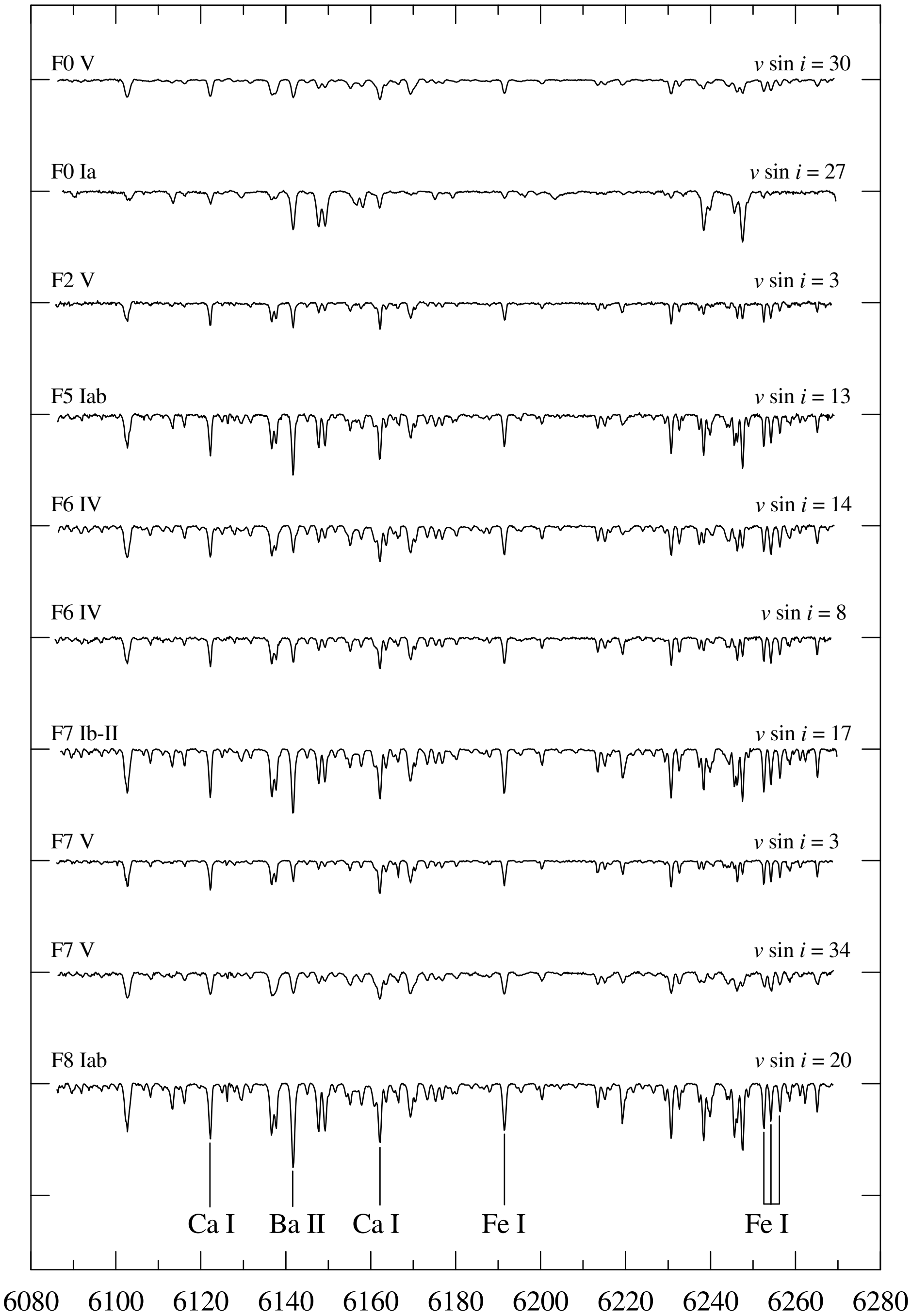

Рис. 14: (a) То же, что на Рис. 1 (a), для эшелле-порядка m=38.

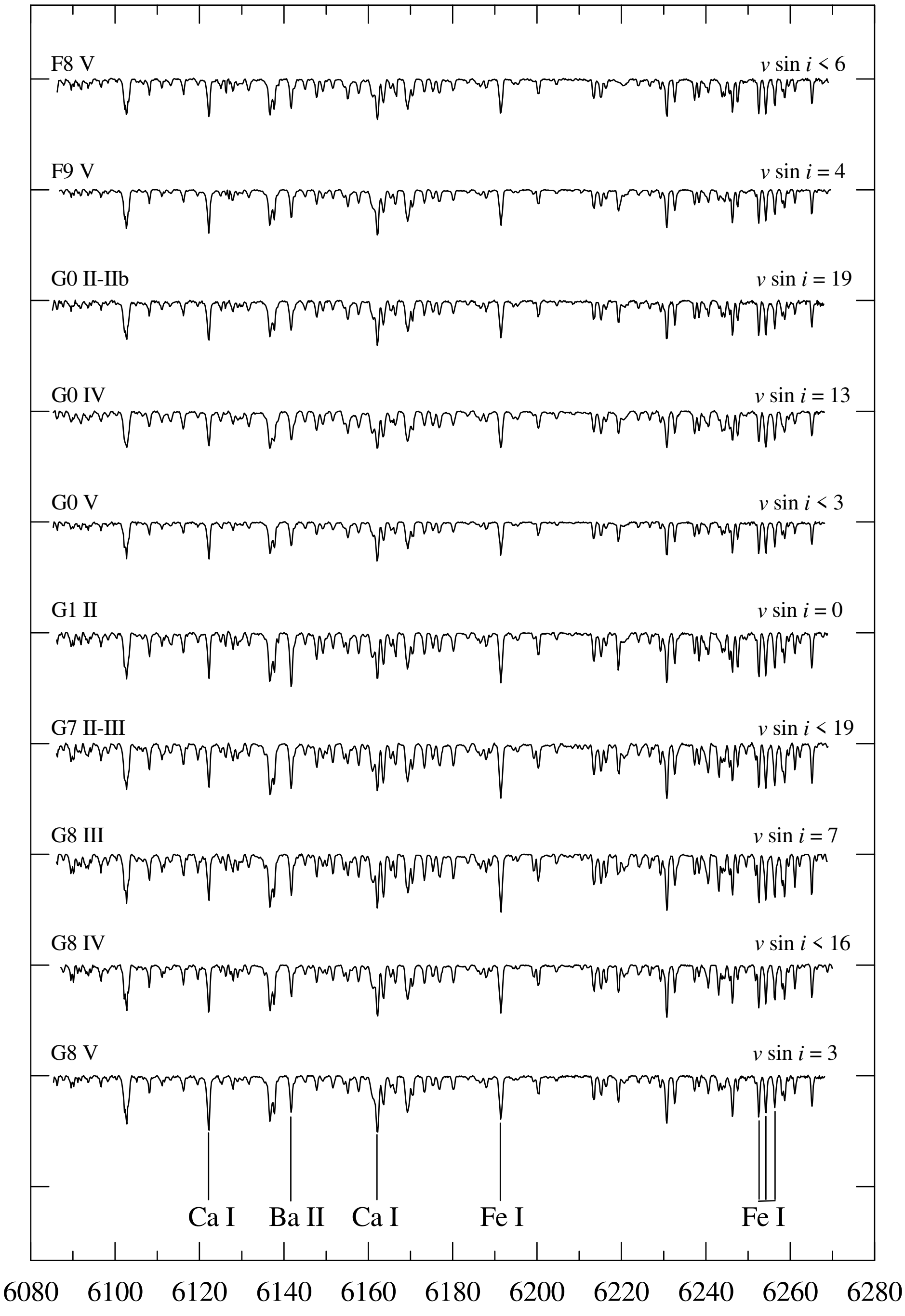

Рис. 14: (b) То же, что на Рис. 1 (b), для эшелле-порядка m=38.

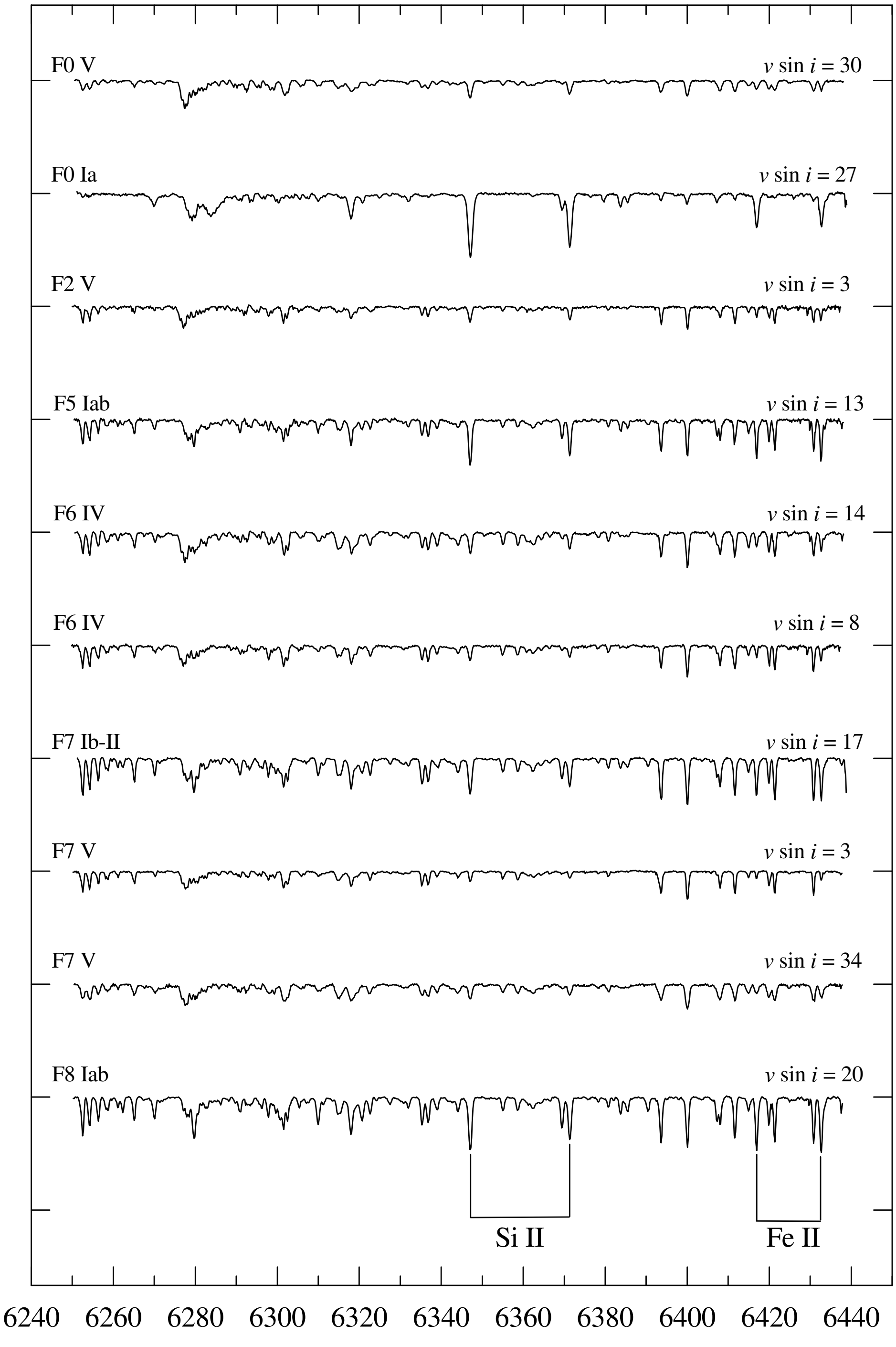

Рис. 15: (а) То же, что на Рис. 1 (а), для эшелле-порядка m=37.

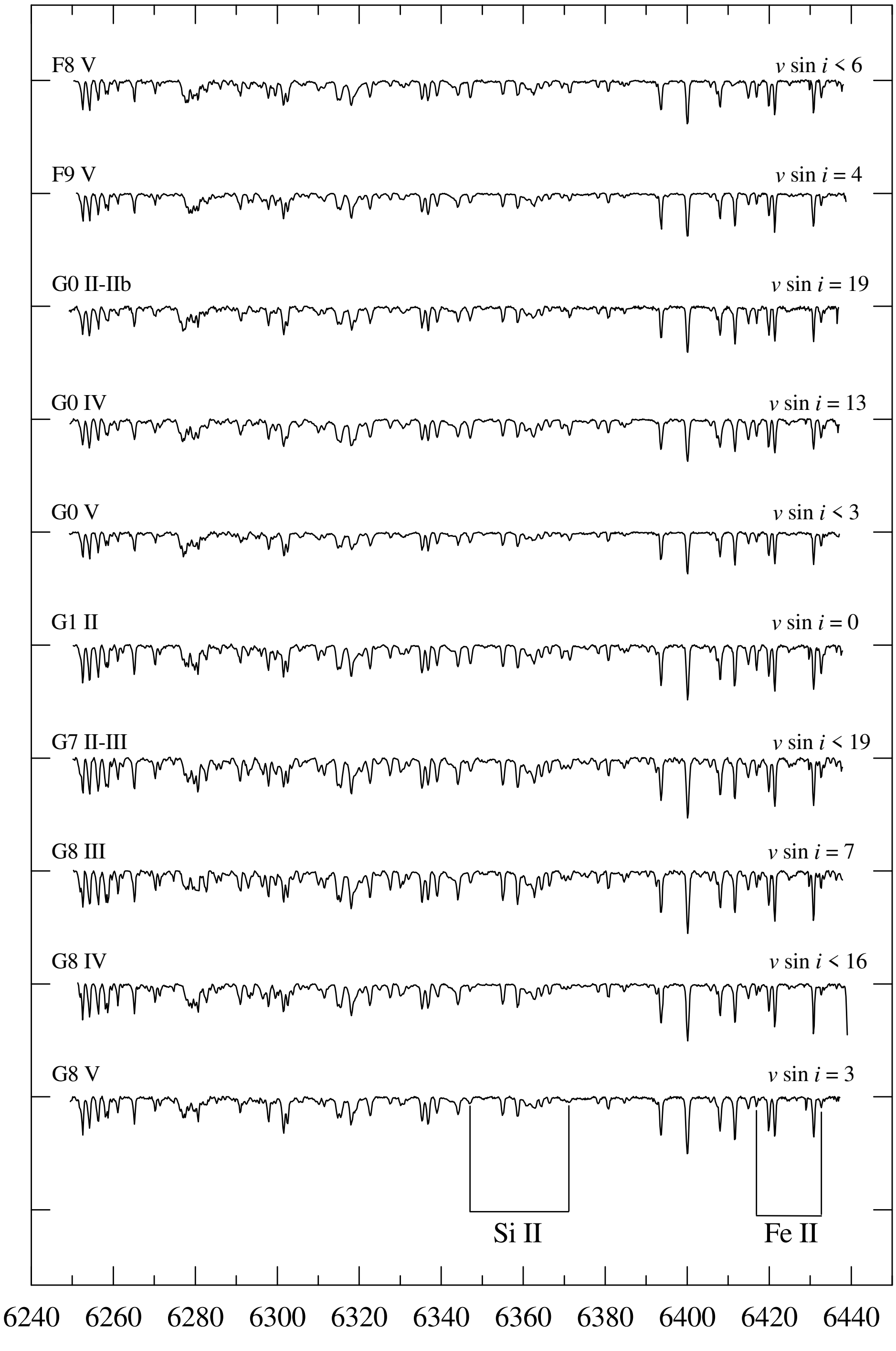

Рис. 15: (b) То же, что на Рис. 1 (b), для эшелле-порядка m=37.

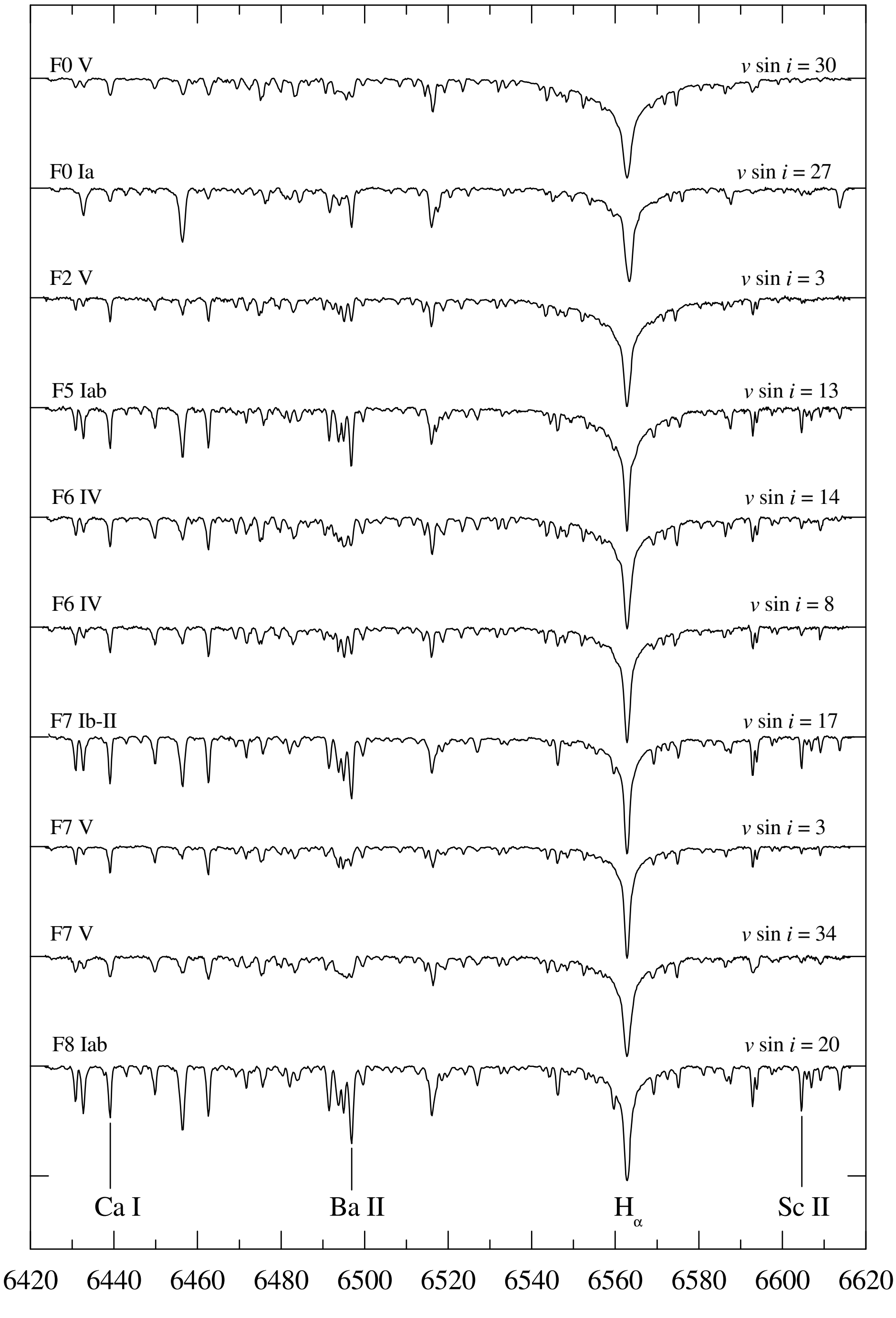

Рис. 16: (a) То же, что на Рис. 1 (a), для эшелле-порядка m=36.

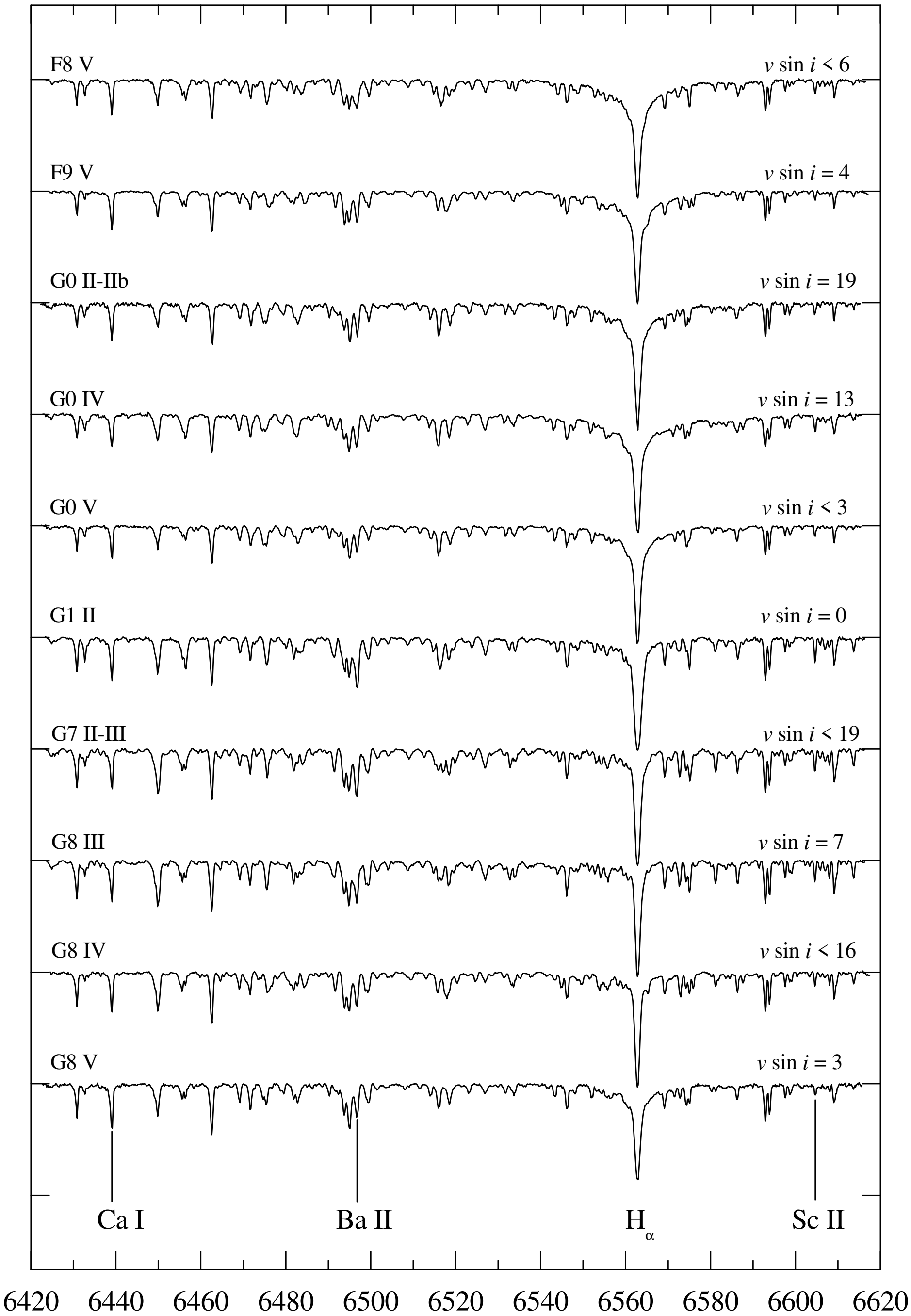

Рис. 16: (b) То же, что на Рис. 1 (b), для эшелле-порядка m=36.

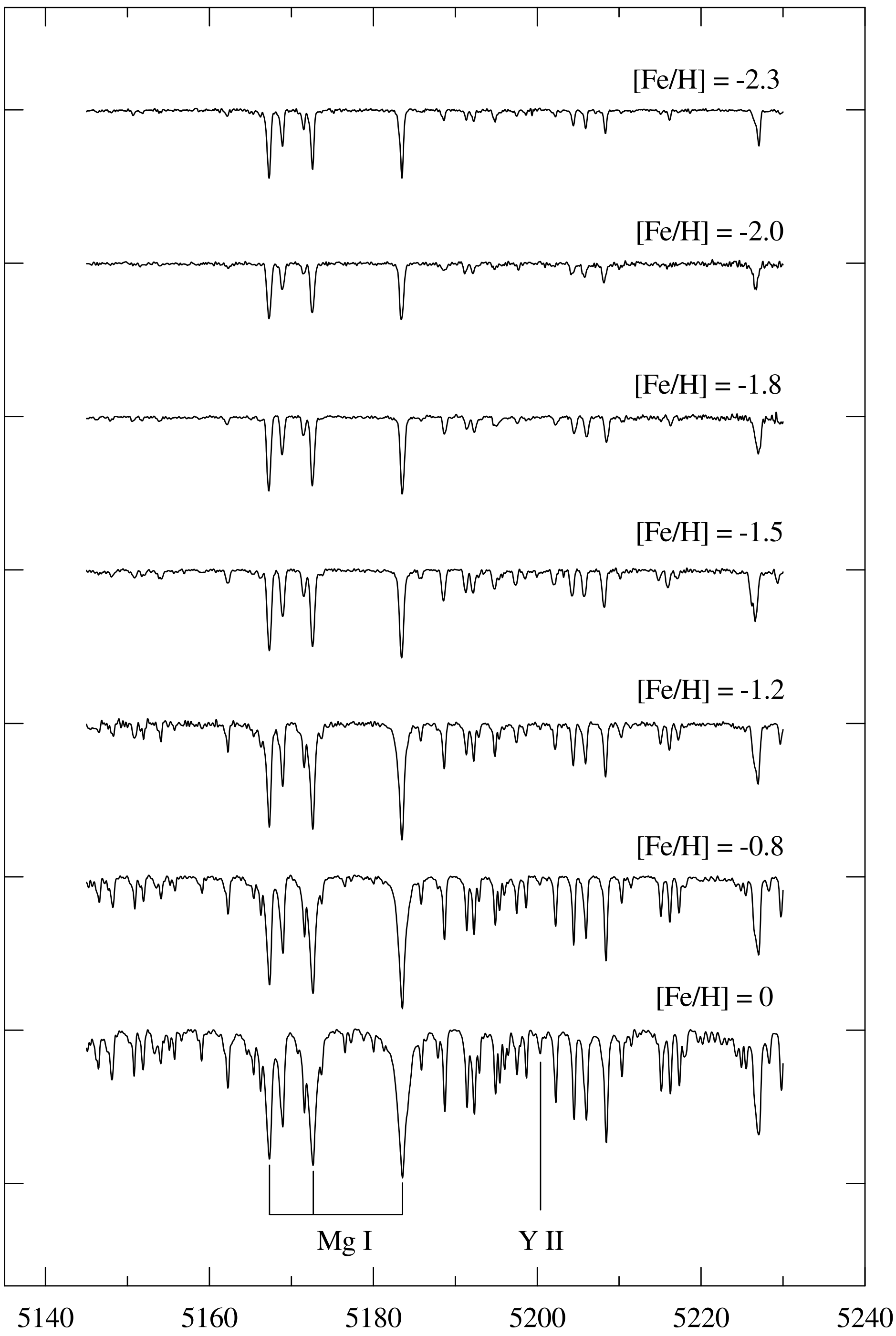

Рис. 17: (а) Участок эшелле-порядка m = 45 для звезд, перечисленных в Таб. 2. Указаны металличности звезд и отмечены некоторые линии, информация о которых приведена в Таб. 3.

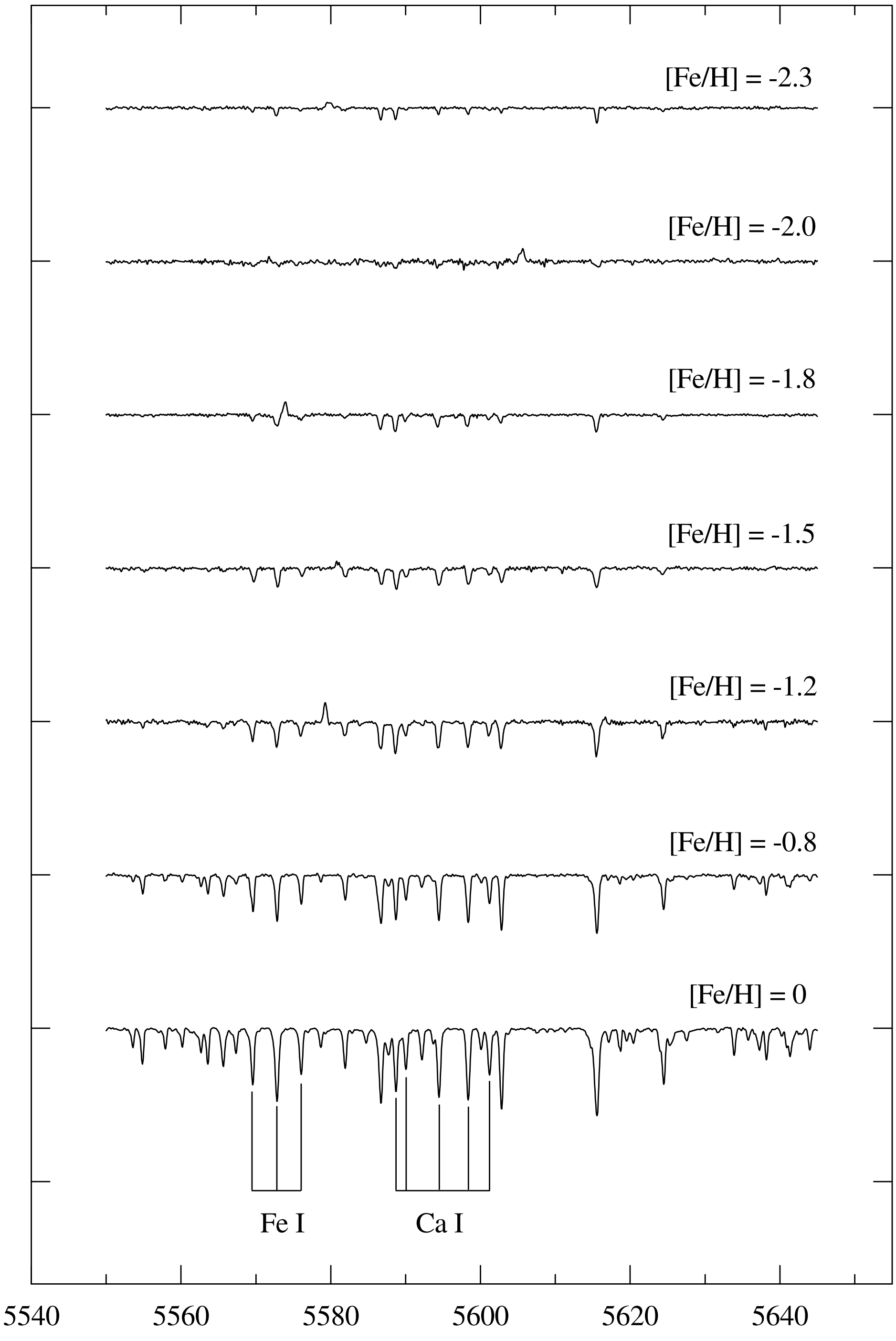

Рис. 17: (b) То же, что и на Рис. 17(a), для эшелле-порядка $m = 42$.

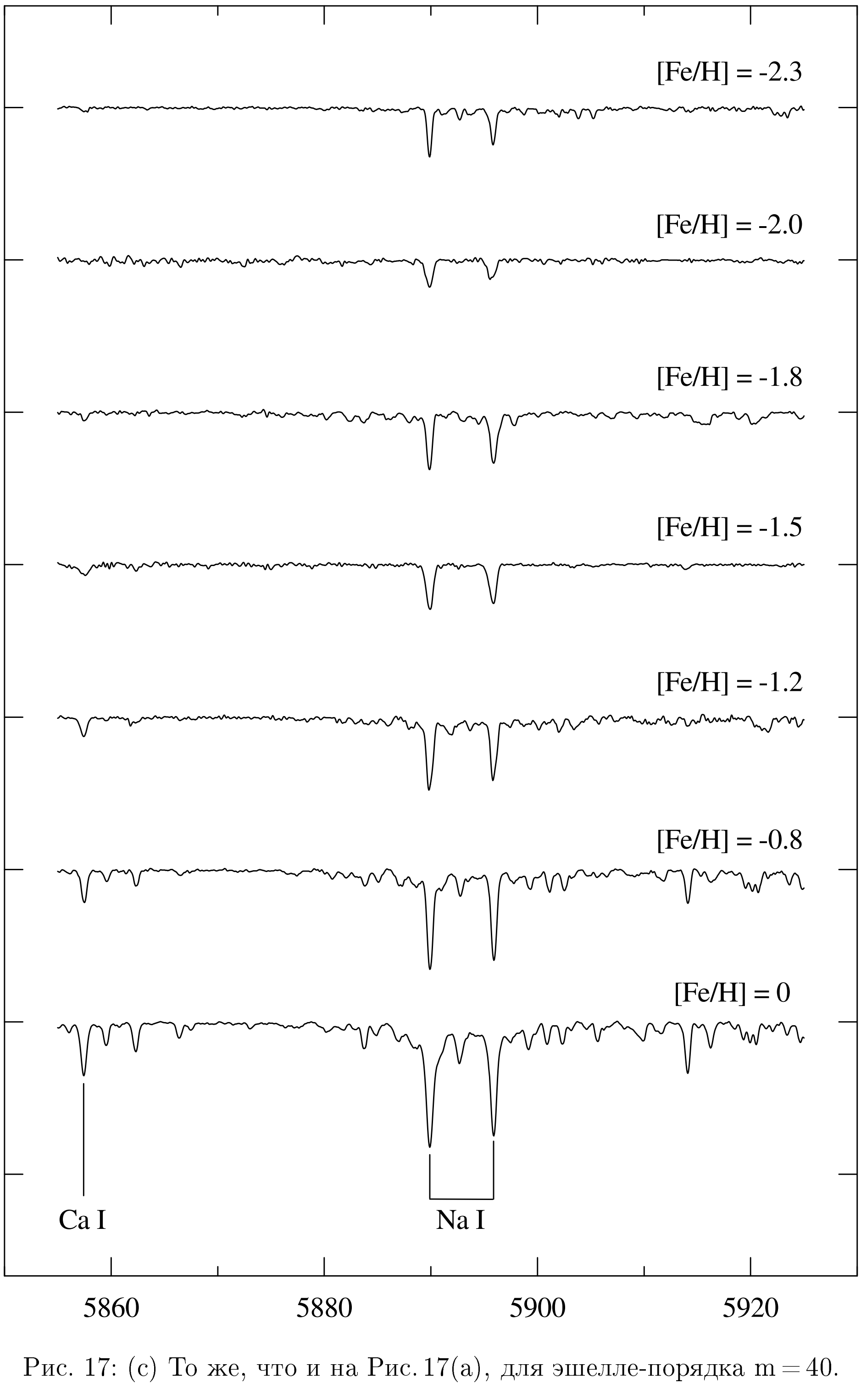

Рис. 17: (с) То же, что и на Рис. 17(а), для эшелле-порядка m = 40.