

УДК 524.338.2:52-355

В[е]-ЗВЕЗДА СІ САМ: АТЛАС СПЕКТРА ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ В ИНТЕРВАЛЕ 395–780 НМ

© 2025 В. Г. Клочкова^{1*}, А. С. Мирошниченко^{2,3}, В. Н. Комарова¹, Н. С. Таволжанская¹

¹Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

²Университет Северной Каролины, Гринсборо, Северная Каролина, 27402 США

³Астрофизический институт им. Фесенкова, Алматы, 050020 Казахстан

Поступила в редакцию 5 августа 2025 года; после доработки 10 сентября 2025 года;
принята к публикации 11 сентября 2025 года

Представлен атлас спектра В[е]-звезды СІ Сам, полученного на 6-м телескопе БТА САО РАН со спектрографом НЭС в интервале длин волн 395–780 нм с разрешением $\lambda/\Delta\lambda \geq 60\,000$. Атлас с отождествлением около 400 спектральных деталей иллюстрирует разнообразие особенностей спектра уникальной звезды, формирующихся в комплексной околозвездной среде. В спектре доминируют мощные однопиковые эмиссии НІ, НеІ и множество двухпиковых разрешенных и запрещенных эмиссий ионов химических элементов от CNO-триады до металлов (Mg, Al, Ti, V, Cr, Fe) с «прямоугольными» профилями. Преобладают в спектре эмиссии Fe II и [Fe II], однако обнаружены и несколько двухпиковых запрещенных эмиссий ионов: [V II], [Cr II], [Ni II]. Атлас создан в графическом виде, каждому эшелле-порядку соответствует отдельный рисунок. Список отождествленных линий, включая ряд известных межзвездных деталей, приведен в форме таблицы. Для СІ Сам подтвержден статус сверхгиганта.

Ключевые слова: методы: спектроскопия — звезды: с эмиссионными линиями, Ве — звезды: отдельные: СІ Сам

1. ВВЕДЕНИЕ

Горячая звезда СІ Сам — оптический компонент рентгеновской двойной системы XTE J0421+560. Пристальный интерес астрономов к этому объекту возник после регистрации весной 1998 г. мощной рентгеновской вспышки, которая сочеталась с ростом видимого потока на две звездные величины (Clark et al., 2000). После регистрации непродолжительной вспышки началось интенсивное изучение объекта во всех диапазонах длин волн, и результаты последующих исследований позволили отнести СІ Сам к ультраярким рентгеновским источникам (Bartlett et al., 2019), демонстрирующим умеренную переменность рентгеновского и оптического потока. Регистрация первых после вспышки спектров СІ Сам в оптическом диапазоне выявила основные особенности: мощные эмиссии НІ, НеІ и множество разрешенных и запрещенных эмиссий Fe II с двухпиковыми профилями (Miroshnichenko et al., 2002; Robinson et al., 2002). Для изучения поведения оптического спектра СІ Сам со временем принципиальны наблюдения с высоким спектральным

разрешением, выполненные Robinson et al. (2002) через две недели после вспышки 1998 г. на 2.7-м телескопе обсерватории McDonald. Robinson et al. (2002) отождествили детали спектра, оценили их параметры и указали области формирования различных типов эмиссий. Для понимания особенностей спектров звезд с феноменом В[е] важны работы Maravelias et al. (2017; 2018). Получив спектры с высоким разрешением для выборки В[е]-звезд, авторы этих работ изучили различные типы эмиссий и пришли к выводу о возникновении специфических двухпиковых эмиссий в совокупности оболочечных структур в околозвездной среде, чаще всего в виде оптически тонкого компактного диска или же совокупности концентрических дуг. Maravelias et al. (2018) рассмотрели возможные варианты формирования подобной околозвездной среды. Одним из основополагающих результатов указанной работы является вывод об отсутствии единого мнения о том, является ли двойственность причиной образования кольцевых структур, поскольку компаньон есть не у всех изученных объектов с феноменом В[е]. Следовательно, можно рассматривать и альтернативные сценарии, такие как (квазипериодические) выбросы массы, вызванные пульсациями или другими нестабильностями.

*E-mail: Valentina.R11@yandex.ru

В последние три десятилетия на нескольких эшелльных спектрографах 6-м телескопа БТА САО РАН выполняется спектроскопия высокого разрешения избранных горячих звезд различных масс (LBV-кандидатов, Be- и B[e]-звезд, в том числе и CI Cam) по программам Е. Л. Ченцова и А. С. Мирошниченко. Первые результаты для CI Cam были опубликованы в 2002 г. в работе Miroshnichenko et al. (2002), в которой выявлены основные особенности спектра — крайне интенсивные эмиссии H I и He I и множество эмиссий ионов ряда элементов, преимущественно железа, с «прямоугольными», почти вертикальными, профилями. Опыт первых лет работы с оптическим спектром CI Cam показал необходимость и возможность выполнения спектрального мониторинга звезды для отслеживания переменности профилей спектральных деталей и картины лучевых скоростей. Эта трудоемкая задача требует многократных наблюдений с высоким спектральным разрешением в широком интервале длин волн. Результаты анализа оптических спектров за 2002–2023 гг. опубликованы в работе Klochkova et al. (2024). Все спектры для этих дат содержат «прямоугольные» профили двухпиковых низковозбужденных эмиссий ионов. Неожиданным оказался вывод о спокойном кинематическом состояниям системы CI Cam: средняя скорость по эмиссиям для всех дат наблюдений $V_r(\text{aver}) = -53.1 \pm 0.5 \text{ км с}^{-1}$. Полуамплитуда изменения (среднеквадратичное уклонение) $\Delta V_r = 2.5 \text{ км с}^{-1}$. Поведение запрещенной линии [N II]5755 Å со временем не отличается от других эмиссий с вертикальными профилями. Лучевая скорость, соответствующая ее положению, стабильна на протяжении всей наблюдений после 2002 г. и принята за системную: $V_r = -55.4 \pm 0.6 \text{ км с}^{-1}$.

Интерес к исследованию CI Cam не ослабевает. Результаты ее долговременной многоцветной фотометрии демонстрируют слабую фотометрическую нестабильность звезды, что позволяет ожидать в будущем повторения в системе CI Cam нестандартных событий. Поэтому мы сочли актуальной подготовку детального спектрального атласа, который может значительно облегчить дальнейшее изучение оптического спектра звезды. В разделе 2 данной статьи кратко описаны методы наблюдений и обработки данных. Список всех отождествленных спектральных деталей, описание атласа и комментарии к отдельным его фрагментам представлены в разделе 3. В разделе 4 мы кратко суммируем основные результаты и представляем полный атлас.

2. НАБЛЮДЕНИЯ И ОБРАБОТКА СПЕКТРОВ

Для создания атласа мы использовали два спектра высокого разрешения из коллекции спек-

тров, полученных в ходе долговременного спектрального мониторинга этой звезды на 6-м телескопе БТА в сочетании с эшелле-спектрографом НЭС (Panchuk et al., 2017), стационарно расположенным в фокусе Нэсмита. НЭС обеспечивает спектральное разрешение $R = \lambda/\Delta\lambda \geq 60\,000$. Для подготовки атласа мы выбрали из коллекции спектр, полученный 03.09.2015 (JD = 2457269.47). Преимущество этого спектра заключается в том, что он зарегистрирован в широком интервале длин волн 395–698 нм. Для продления диапазона в длинноволновую область, до $\lambda = 778 \text{ нм}$, мы привлекли спектр за 09.02.2023 (JD = 2459985.28). Оба спектра получены с матрицей ПЗС с числом элементов 4608×2048 , размер элемента $0.0135 \times 0.0135 \text{ мм}$; шум считывания $1.8 e^-$. Для уменьшения потерь потока на входной щели спектрограф НЭС снабжен резателем изображения звезды. С использованием резателя каждый спектральный порядок повторяется трижды.

Экстракция одномерных данных из двумерных эшелле-изображений выполнена с использованием контекста ECHELLE пакета MIDAS, модифицированного Yushkin and Klochkova (2005) с учетом геометрии эшелле-кадра спектрографа НЭС. Следы космических частиц удалены стандартным приемом — медианным усреднением пары спектров, полученных последовательно. Для калибровки шкалы длин волн использовалась лампа с наполнением Th-Ag. Все последующие шаги в обработке одномерных спектров выполнены с использованием современной версии пакета DECH20t (Galazutdinov, 2022). Систематическая ошибка измерений гелиоцентрической лучевой скорости V_r по теллурическим деталям и по межзвездным линиям дублета Na I не превышает 0.25 км с^{-1} по одной линии; ошибка измерения V_r по широким деталям не превышает 0.5 км с^{-1} . Отметим, что высокая точность определения гелиоцентрической скорости служила дополнительным критерием надежности отождествления.

3. АТЛАС И СПИСОК ОТОЖДЕСТВЛЕННЫХ ЛИНИЙ

Атлас представляет собой совокупность 59 рисунков, каждый из которых соответствует отдельному эшелле-порядку спектра CI Cam. Перекрытие порядков уменьшается с длиной волны и, начиная с $\lambda \approx 5600 \text{ Å}$, между ними появляются разрывы. По оси ординат указана относительная интенсивность I/I_{cont} , по оси абсцисс — наблюдаемая длина волны. На рисунках отмечены отождествленные элементы спектра с лабораторной длиной волны, округленной до 0.1 Å . Положение отождествленных деталей на рисунках соответствует наблюдаемой длине волны. Вершины сильных эмиссий

Н I и Не I на рисунках атласа обрезаны, но при необходимости их полный профиль можно видеть на рис. 1 и 2 в статье Klochkova et al. (2024).

Все детали спектра перечислены в таблице 1, для каждой из них указана лабораторная длина волны, и для большинства линий приведен мультиплет согласно Moore (1945). В атлас и в таблицу 1 включены также несколько известных межзвездных аборбций. В атласе, ниже уровня континуума, указаны несколько DIBs, межзвездные детали Са II, К I и межзвездные компоненты дублета D-линий На I. Более подробно межзвездные детали в спектре и межзвездное поглощение для СI Cam изучены ранее Klochkova et al. (2024). Несколько фрагментов атласа содержат теллурические аборбции молекул O_2 и H_2O , их положения на рисунках отмечены точками. Точками большего размера показаны положения теллурических эмиссий [O I] 5577 и 6300 Å.

Отождествление деталей в спектрах СI Cam мы выполнили, используя информацию из статей, основанных на спектроскопии на НЭС/БТА родственных звезд с феноменом B[e] (Chentsov et al., 2010; Klochkova and Chentsov, 2016), а также сведения из базы данных VALD (Kurka et al., 1999) и таблиц мультиплетов в известной работе Moore (1945).

Рисунок 2 в статье Klochkova et al. (2024) демонстрирует основное различие двух типов эмиссий в спектре СI Cam, а именно многократное различие ширин интенсивных эмиссий Н I, Не I и эмиссий с «прямоугольными» профилями. Эмиссии Н I, Не I являются доминирующими деталями в спектре СI Cam, интенсивность вершин их профилей превышает уровень локального континуума в 25–45 раз. Причем, в отличие от спектров большинства звезд с B[e]-феноменом, профиль Нα в спектре СI Cam однопиковый (см. рис. 1 в статье Klochkova et al., 2024). Для сравнения укажем профили Нα в работах Aret et al. (2016), Maravelias et al. (2018), Miroshnichenko et al. (2023).

При стационарном положении эмиссионного профиля Нα зарегистрированы незначительные изменения интенсивности вершины профиля этой линии (Klochkova et al., 2024) и наличие небольшого горба на ее длинноволновом крыле (Zickgraf, 2003; Klochkova et al., 2024). Отметим отсутствие профилей типа Р Cyg в спектре СI Cam у всех линий Н I и Не I, что свидетельствует об отсутствии ветра и связанной с ним потерей вещества (см. рис. 1 и 2 в работе Klochkova et al., 2024). Отсутствие профилей типа Р Cyg было подчеркнуто и в самом раннем исследовании спектров СI Cam, полученных с высоким разрешением сразу после вспышки в апреле 1998 года (Robinson et al., 2002).

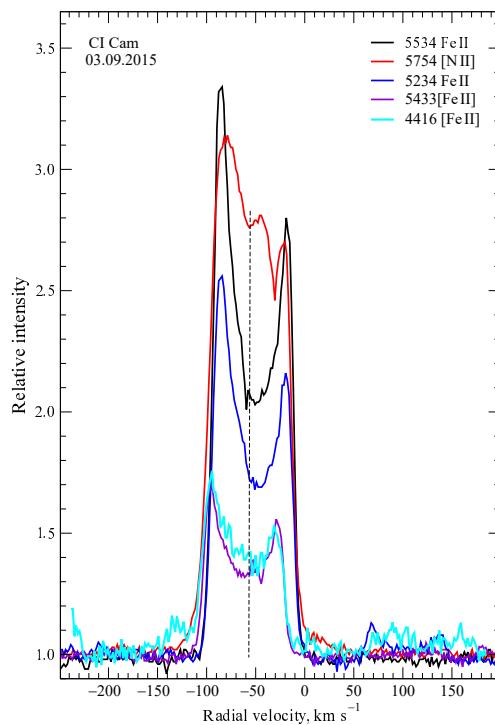


Рис. 1. Профили избранных эмиссий ионов в спектре, полученном 3 сентября 2015 г. Положение вертикали соответствует системной скорости $V_{\text{sys}} = -55.4 \text{ км с}^{-1}$.

Следующая характерная пекулярность спектра — множество узких двухпиковых эмиссий ионов (Fe II, [Fe II], Cr II, [Cr II], S II, [S II], N II, [N II] и др.). По количеству найденных узких эмиссий и по их интенсивности лидируют ионы Fe II, в представленном интервале длин волн их 110. Запрещенных эмиссий [Fe II] в четыре раза меньше, они имеют невысокую интенсивность, в основном не выше 10% над локальным континуумом. Для иллюстрации на рис. 1 приведены типичные разрешенные эмиссии Fe II и пара самых интенсивных в нашем спектре запрещенных эмиссий [Fe II]. У всех профилей запрещенных и разрешенных эмиссий на рисунке отношение интенсивностей пиков $V/R > 1$, а также все они имеют глубокую центральную депрессию. Запрещенные эмиссии несколько уже разрешенных. Сопоставление аналогичных рисунков для различных дат наблюдений, приведенных Klochkova et al. (2024), указывает на синхронность изменений интенсивности у разрешенных и запрещенных эмиссий.

Таблица 1. Детали, отождествленные в спектре СI Сам

$\lambda_{\text{lab}}, \text{\AA}$	Element (multiplet)						
3964.73	He I (5)	4287.40	[Fe II] (7F)	4541.52	Fe II (38)	4825.72	Fe II (30)
3970.07	He	4296.85	Fe III (121)	4549.47	Fe II (38)	4833.20	Fe II (30)
3973.26	O II (6)	4303.17	Fe II (27)	4555.89	Fe II (37)	4840.00	Fe II (30)
3982.72	O II (6)	4313.43	O II (78)	4558.58	Fe II (20)	4848.25	Cr II (30)
3995.00	N II (12)	4319.63	O II (2)	4576.33	Fe II (38)	4855.54	Fe II (25)
4002.55	Fe II (190)	4325.77	O II (2)	4580.07	Fe II (26)	4861.33	$H\beta$
4009.27	He I (55)	4340.46	$H\gamma$	4582.84	Fe II (37)	4871.27	Fe II (25)
4023.97	He I (54)	4351.76	Fe II (27)	4583.83	Fe II (38)	4876.41	Cr II (30)
4026.19	He I (18)	4359.33	[Fe II] (7F)	4588.22	Cr II (44)	4889.63	[Fe II] (4F)
4068.62	[S II] (1F)	4363.21	[O III] (2F)	4596.18	O II (15)	4893.78	Fe II (36)
4069.64	O II (10)	4369.28	O II (26)	4601.48	N II (5)	4905.35	[Fe II] (20F)
4076.22	[S II] (1F)	4384.32	Fe II (32)	4607.15	N II (5)	4906.88	O II (28)
4101.74	$H\delta$	4385.38	Fe II (27)	4620.51	Fe II (38)	4921.93	He I (48)
4112.03	O II (21)	4387.93	He I (51)	4629.34	Fe II (37)	4923.92	Fe II (42)
4119.22	O II (30)	4410.06	C II (40)	4635.33	Fe II (186)	4930.5	[Fe III] (1F)
4120.82	He I (16)	4413.60	Fe II (32)	4643.09	N II (5)	4950.74	[Fe II] (20F)
4122.98	Fe III (118)	4413.78	[Fe II] (7F)	4649.14	O II (1)	4958.92	[O III] (1F)
4128.07	Si II (3)	4416.27	[Fe II] 6F	4656.97	Fe II (43)	4973.39	[Fe II] (20F)
4130.89	Si II (3)	4416.37	S II (53)	4658.03	[Fe III] (3F)	4976.33	[V II] (7F)
4137.93	Fe III (118)	4419.60	Fe III (4)	4663.7	Fe II (44)	4984.5	Fe II
4143.76	He I (53)	4427.99	Mg II (9)	4665.80	Fe II (26)	4990.5	Fe II
4168.41	S II (44)	4433.99	Mg II (9)	4666.78	Fe II (37)	4993.35	Fe II (36)
4174.04	S II (65)	4437.55	He I (50)	4667.28	N II (11)	5001.47	N II (19)
4178.85	Fe II (28)	4452.11	[Fe II] (7F)	4670.17	Fe II (25)	5002.02	Fe III (19)
4179.67	N II (50)	4457.96	[Fe II] (6F)	4679.23	Fe I (688)	5006.84	[O III] (1F)
4185.92	Fe II	4461.43	Fe II (26)	4685.68	He II (1)	5011.3	[Fe III] (1F)
4185.95	S II	4471.48	He I (14)	4701.5	[Fe III] (3F)	5014.03	S II (15)
4233.17	Fe II (27)	4474.91	[Fe II] (7F)	4713.14	He I (12)	5015.68	He I (4)
4243.98	[Fe II] (21F)	4481.13	Mg II (4)	4728.07	[Fe II] (4F)	5018.44	Fe II (42)
4257.38	[Fe II]	4488.33	Ti II (115)	4731.44	Fe II (43)	5022.79	Fe II
4257.42	S II (66)	4491.40	Fe II (37)	4733.9	[Fe III] (3F)	5027.19	S II (1)
4263.70	Fe II	4508.28	Fe II (37)	4754.7	[Fe III] (3F)	5037.0	C II (17)
4267.80	S II (49)	4515.33	Fe II (37)	4762.47	DIB	5041.06	Si II (5)
4276.8	[Fe II]	4520.22	Fe II (37)	4769.4	[Fe III] (3F)	5047.29	C II (15)
4273.42	Fe III (121)	4522.63	Fe II (38)	4814.55	[Fe II] (20F)	5047.74	He I (47)
4278.54	S II (49)	4534.17	Fe II (37)	4824.14	Cr II (30)	5061.79	Fe II

Таблица 1. (Продолжение)

$\lambda_{\text{lab}}, \text{\AA}$	Element (multiplet)						
5065.42	[Ti II](19F)	5432.98	Fe II (55)	5747.29	N II (9)	6158.19	O I (10)
5073.59	N II (10)	5433.15	[Fe II](18F)	5754.64	N II](3)	6160.75	Fe II (161)
5075.83	Fe II	5445.97	Fe II (53)	5780.48	DIB	6195.98	DIB
5081.92	Fe II (221)	5457.72	Fe II	5793.16	Fe II (47)	6203.05	DIB
5086.69	Fe III (5)	5466.55	S II (11)	5795.16	DIB	6229.34	Fe II (34)
5089.28	Fe II	5472.63	Cr II (50)	5797.06	DIB	6231.75	Al II (10)
5093.47	Fe II (205)	5478.36	Cr II (50)	5813.67	Fe II (163)	6233.52	Fe II
5100.65	Fe II (35)	5481.17	[Fe I](20F)	5823.17	Fe II (164)	6238.38	Fe II (74)
5106.11	Fe II	5487.52	[V II](5F)	5835.43	Fe II (58)	6240.66	Fe I (64)
5117.11	Fe II	5492.82	Ti II (68)	5849.81	DIB	6242.52	N II (57)
5120.34	Fe II (35)	5503.18	Cr II (50)	5875.66	He I (11)	6247.56	Fe II (74)
5127.32	Fe III (5)	5506.27	Fe II	5889.95	Na I(1)	6248.92	Fe II
5132.66	Fe II (35)	5510.68	Cr II (23)	5895.92	Na I(1)	6270.24	Fe I (342)
5276.00	Fe II (48)	5525.14	Fe II (56)	5910.57	DIB	6283.86	DIB
5284.09	Fe II (41)	5529.94	Ti II (68)	5952.53	Fe II (182)	6291.83	Fe II
5291.67	Fe II	5534.86	Fe II (55)	5957.61	Si II (4)	6300.23	[O I](1F) tellur
5298.79	Fe I (875)	5544.20	Fe II	5978.97	Si II (4)	6305.51	S II (19)
5306.6	Fe III (113)	5548.21	Fe II	5979.90	Fe III (117)	6312.68	S II (26)
5316.61	Fe II (49)	5554.68	[V II](20F)	5991.38	Fe II (46)	6317.99	Fe II
5322.78	Cr II (24)	5564.94	S II (6)	5999.30	Fe III (117)	6318.23	Mg I (23)
5325.56	Fe II (19)	5567.82	Fe II	6007.34	[Ni II](8F)	6318.75	Mg I (23)
5337.71	Fe II (48)	5577.34	[O I](3F) tellur	6032.30	Fe III (117)	6324.80	DIB
5330.6	Fe II	5588.15	[Fe II](39F)	6041.90	S I (10)	6331.96	Fe II (199)
5339.65	[Cr II](12F)	5606.11	S II (11)	6045.50	Fe II (200)	6347.09	Si II (2)
5346.56	Fe II (49)	5609.73	DIB	6061.50	[Cr I](12F)	6369.46	Fe II (40)
5354.15	[Cr II](12F)	5627.49	Fe II (57)	6067.88	[Cr I](12F)	6371.36	Si II (2)
5362.86	Fe II (48)	5639.96	S II (14)	6077.80	[Ti II](26F)	6379.32	DIB
5376.47	[Fe II](19F)	5640.32	S II (11)	6084.11	Fe II (46)	6383.75	Fe II
5381.02	Ti II (69)	5648.90	Fe I 625)	6103.54	Fe II (200)	6385.47	Fe II
5395.86	Fe II	5666.64	N II (3)	6113.38	Fe II (46)	6402.42	Fe I (1344)
5408.84	Fe II (184)	5676.02	N II (3)	6116.05	Fe II (46)	6407.30	Fe II (74)
5412.64	[Fe II](17F)	5679.56	N II (3)	6124.57	[Ti II](22F)	6416.90	Fe II (74)
5414.09	Fe II (49)	5686.21	N II (3)	6129.71	Fe II (46)	6432.65	Fe II (40)
5420.90	Cr II (23)	5696.60	Al III (2)	6147.74	Fe II (74)	6442.97	Fe II
5425.27	Fe II (49)	5710.76	N II (3)	6149.24	Fe II (74)	6446.43	Fe II (199)
5427.83	Fe II	5730.67	N II (3)	6155.98	O I(10)	6456.38	Fe II (74)

Таблица 1. (Продолжение)

λ_{lab} , Å	Element (multiplet)						
6482.07	N II (8)	6770.05	DIB	7155.14	[Fe II](14F)	7462.38	Fe II (73)
6482.20	Fe II (199)	6779.74	C II (14)	7181.02	Fe I (33)	7468.29	NI (3)
6491.61	Ti II (91)	6780.27	C II (14)	7191.66	Fe I (1274)	7479.69	Fe II (72)
6493.06	Fe II	6783.75	C II (14)	7222.39	Fe II (73)	7495.67	Fe I (1275)
6504.9	N II (45)	6811.44	DIB	7231.12	C II (3)	7497.68	[V II](3F)
6506.33	Fe II	6823.48	Al II (9)	7236.19	C II (3)	7506.54	Fe II
6533.0	N II (45)	6829.01	[Fe II](31F)	7237.17	C II (3)	7513.17	Fe II
6548.1	[N II](1F)	6829.61	Fe I (1195)	7255.28	Si I (59)	7515.13	[V II](4F)
6562.82	H α	6837.00	Fe I (1225)	7278.48	Fe I (1274)	7515.88	Fe II (73)
6578.03	C II (2)	6837.14	Al II (9)	7281.35	He I (45)	7533.84	[V II](3F)
6582.85	C II (2)	6852.67	DIB	7289.05	Fe II (72)	7571.69	[V II](3F)
6583.6	[N II](1F)	6857.25	Fe I (1006)	7301.57	Fe II (72)	7578.96	Si I
6586.69	Fe II	6860.29	Fe I (205)	7341.78	Fe I (1307)	7698.98	KI (1)
6613.62	DIB	6861.93	Fe I (109)	7353.53	Fe I (1251)	7711.71	Fe II (73)
6626.75	[Ti II](37F)	7042.06	Al II (3)	7357.20	DIB	7724.7	[S I](3F)
6630.5	N II (41)	7056.60	Al II (3)	7363.96	Fe I (1274)	7731.7	Fe II
6638.36	Fe I (1279)	7065.72	He I (10)	7377.83	[Ni II](2F)	7752.86	[Cr II](11F)
6660.71	DIB	7115.13	C II (20)	7379.57	[Ni II](2F)	7771.96	O I (1)
6665.15	DIB	7119.45	C II (20)	7388.16	[Fe II](14F)	7775.40	O I (1)
6678.15	He I (46)	7125.49	C II (20)	7774.18	O I (1)		
6721.36	O II (4)	7411.90	[V II](4F)	7413.33	[Ni II](2F)		
6726.84	C II (21)	7134.99	Fe II (197)	7452.50	[Fe II](14F)		

Наличие запрещенных линий среди совокупности этих узких эмиссий указывает на их формирование в оптически тонкой и слабо расширяющейся среде. Ранее Zickgraf et al. (1985) предложили модель формирования гибридного спектра горячего массивного гипергиганта в структурированной околосозвездной среде. В последующие годы эта модель двухкомпонентного ветра получила наблюдательное и теоретическое обоснование, а статья Zickgraf et al. (1985) является в настоящее время широко цитируемой.

Изучив спектры CI Cam, полученные на НЭС/БТА в начале 2002 г., Miroshnichenko et al. (2002) пришли к выводу о формировании узких спектральных деталей в наклонном околосозвездном диске, видимом с ребра. Специфические профили этих эмиссий имеют почти вертикальные склоны и вогнутые вершины, что подтверждает их формирование в оптически тонком и близко распо-

ложенном к звезде компактном диске. Наличие структуры у вершин разрешенных и запрещенных эмиссий указывает на стратификацию среды их формирования. Здесь уместно отметить отсутствие подобной строгой прямоугольности профилей в спектрах звезд с B[e]-феноменом — членов выборки в вышеупомянутой работе Maravelias et al. (2018). Согласно результатам Klochkova et al. (2024), в спектре CI Cam интенсивности коротковолновых пиков узких эмиссий выше длинноволновых для всех дат наших наблюдений, за исключением спектра 13.01.2011 с обратным отношением V/R и спектра за 18.11.2008 с равной интенсивностью пиков. Для этих эмиссий было выявлено существенное снижение интенсивностей по мере удаления во времени от вспышки 1998 г. Как следует из фрагментов атласа и таблицы 1, в спектре CI Cam присутствуют слабые симметричные эмиссии многократно ионизованных кислорода

и металлов ([O III], Si III, Al III, Fe III, [Fe III]). Эмиссии различных типов формируются в различных физических условиях комплексной оболочки и имеют многократно различающиеся ширины, что хорошо иллюстрирует рис. 2 в работе Klochkova et al. (2024). Эмиссии [O III] 4959 и 5007 Å низкой интенсивности с симметричными профилями (см. рис. 2) отождествлены надежно, их положения, как следует из таблицы 1 в статье Klochkova et al. (2024), соответствуют общей картине лучевых скоростей.

Фрагменты атласа с теллурическими запрещенными эмиссиями [O I] 5577 и 6300 Å (рис. 3) не содержат явных эмиссий, которые могли бы принадлежать системе CI Cam. На рис. 3а лишь с трудом можно видеть слабый след детали с интенсивностью ниже 5% около теллурической детали [O I] 5577 Å. Еще ниже интенсивность детали, которую можно рассматривать как эмиссию [O I] 6300 Å с ее пониженным потенциалом возбуждения. Подобная картина слабых эмиссий [O I] 5577 и 6300 Å зафиксирована для большей доли звезд выборки, включая и яркую B[e]-звезду 3 Pup (Chentsov et al., 2010; Maravelias et al., 2018). Как следует из работы Chentsov et al. (2010), спектр более холодной звезды 3 Pup существенно отличается от спектра CI Cam. В их спектрах разные типы профилей эмиссий H I и эмиссий металлов, кроме того, в спектре 3 Pup обнаружены фотосферные эмиссии с уверенно выявленной переменностью положений.

Отметим, что Robinson et al. (2002) указали на наличие эмиссии [O I] 5577 в спектрах высокого разрешения, $R = 60\,000$, после вспышки. Близкое качество спектральных данных в нашем атласе и в работе Robinson et al. (2002) позволяет нам говорить о реальности различий физических условий в области формирования этих эмиссий сразу после вспышки и спустя 17 лет. Помимо ситуации с эмиссией [O I] 5577, можно отметить и различия в профилях эмиссий металлов. К примеру, на рис. 7 в работе Robinson et al. (2002) профили эмиссий ионов Ti II, Cr II, Fe II имеют округлые вершины, при этом профили этих же эмиссий металлов на фрагментах нашего атласа (см. рис. 4) — двухпиковье, что хорошо иллюстрирует прошедшие за годы изменения физических условий в околосзвездной среде CI Cam.

Подчеркнем насыщенность спектра CI Cam деталями азота: это множество разрешенных эмиссий иона N II, что хорошо иллюстрирует рис. 5, а также интенсивные запрещенные эмиссии [N II] (рис. 6). Панель (а) рис. 7 содержит и достаточно сильную эмиссию атома азота N I 7468.3 Å. Эта

особенность спектра у далеко проэволюционировавшей звезды может естественно объясняться наработкой азота на предшествующих фазах эволюции массивной звезды и последующим выносом свеженаработанного элемента в околосзвездную среду. Таким образом, имеется указание на высокую исходную массу звезды и довод относить CI Cam к сверхгигантам. Основные критерии, которые позволяют классифицировать звезду как B[e]-сверхгигант, приведены в обзоре Kraus (2019). B[e]-феномен состоит в наличии в спектре звезды совокупности ряда пекулярных деталей: сильных эмиссий H I (и He I в спектрах наиболее горячих объектов с $T_{\text{eff}} > 20\,000$ K), а также эмиссий разрешенных линий ионов металлов и низковозбужденных запрещенных линий. Вторым существенным признаком звезд с феноменом B[e] является большой избыток ИК-потока, обусловленный присутствием в оболочке звезды горячей пыли. Совокупность известных особенностей CI Cam соответствует этим требованиям. Однако со времени открытия феномена B[e] (Allen and Swings, 1976) известно, что звезды, отвечающие этим двум основным признакам, составляют группу весьма разнородных объектов.

Как следует из таблицы 1, помимо многочисленных эмиссий ионов, в спектре CI Cam отождествлены эмиссии и нейтральных атомов N I, O I, Mg I, около 20 линий Fe I. Панель (а) рис. 7, наряду с интенсивными эмиссиями ионов Fe II и [VII], содержит эмиссии нейтральных атомов N I и Fe I. На рис. 7b показан триплет Mg I. Все компоненты ИК-триплета атома кислорода O I 7773 Å имеют высокую интенсивность.

Запрещенные линии дублета [Ca II] 7291 и 7323 Å, типичные для звезд с феноменом B[e] (см., например, публикации Chentsov et al., 2010; Klochkova and Chentsov, 2016; Maravelias et al., 2018), отсутствуют в спектре CI Cam. Отсутствие линий дублета [Ca II] и линии [O I] 6300 Å в спектре CI Cam было отмечено ранее в работе Aret et al. (2016).

Как показали Klochkova et al. (2024), интенсивность и положение эмиссии вблизи $\lambda 4686$ Å в спектре звезды изменяются существенно. На рис. 6 в статье Klochkova et al. (2024) представлены фрагменты для шести дат наблюдений. В спектрах «1», «3», «4» и «5» эта линия отсутствует, в спектре «2» интенсивность эмиссии низка (менее 5% от локального континуума). Значительная интенсивность этой линии, около 16% от уровня локального континуума (см. рис. 8a), зарегистрирована лишь в спектре за сентябрь 2015 г., который использован нами для создания данного атласа. Профиль этой

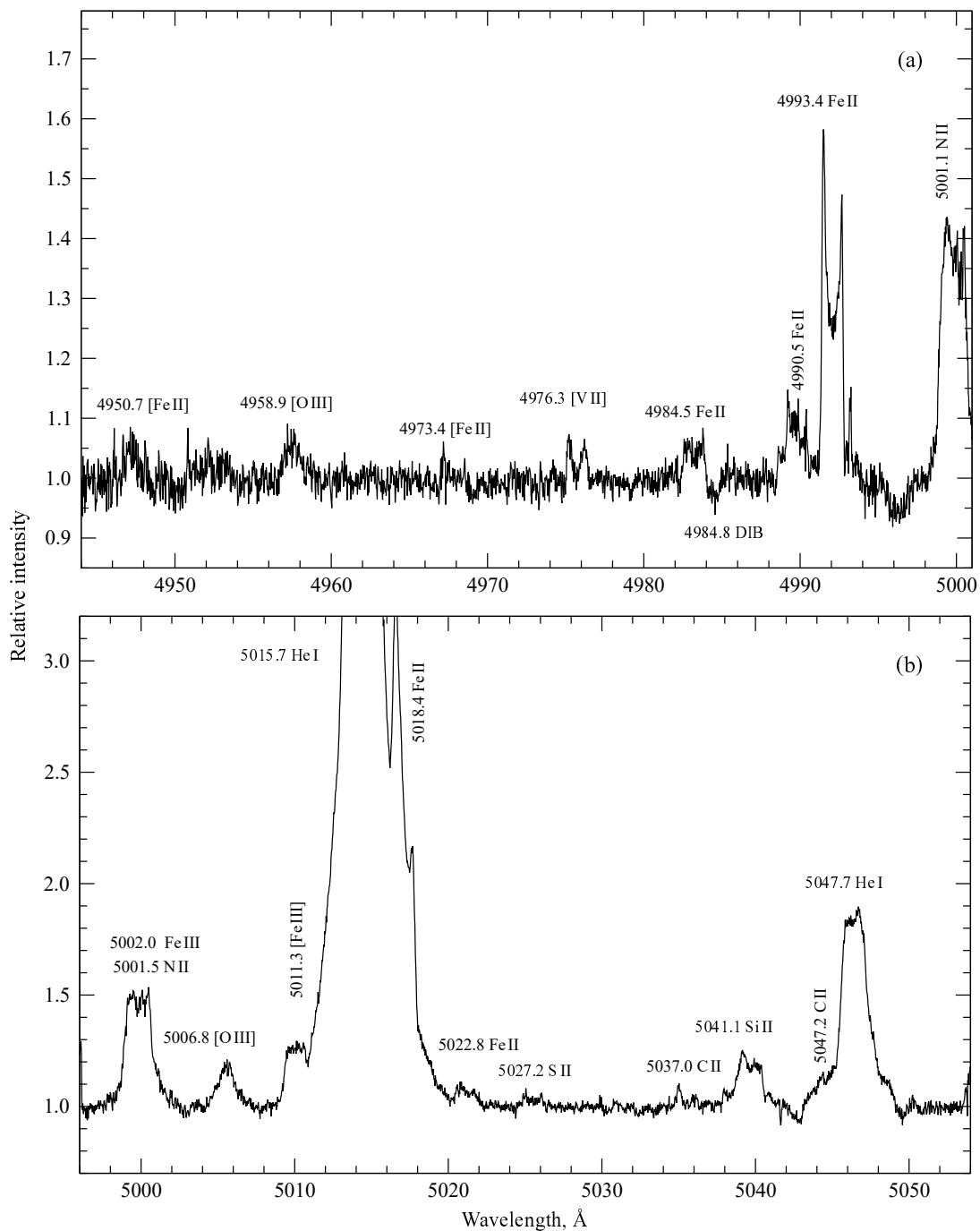


Рис. 2. Боуэновские эмиссии [O III] 4959 и 5007 Å, панели (а) и (б) соответственно.

линии имеет нетипичную форму, а лучевая скорость, соответствующая положению этой детали, $V_r(\lambda 4686) = 63.2 \text{ км с}^{-1}$, значительно отличается от скорости по другим эмиссиям. Имеющиеся в настоящее время спектры высокого разрешения не дают возможности решить вопрос о надежности такой детали для оценки орбитального периода и о локализации формирования этой эмиссии в системе CI Cam. В нашем спектре за 03.09.2015, в

котором уверенно зарегистрирована эмиссия вблизи $\lambda \approx 4686 \text{ Å}$, наблюдается и еще одна важная особенность — пониженная интенсивность эмиссий с «прямоугольными» профилями (Klochkova et al., 2024). Это совпадение позволяет говорить о появлении эмиссии $\lambda 4686 \text{ Å}$ в какие-то фазы неопределенного пока орбитального периода.

Предположение о возможной двойственности CI Cam было высказано еще до вспышки, в ранней

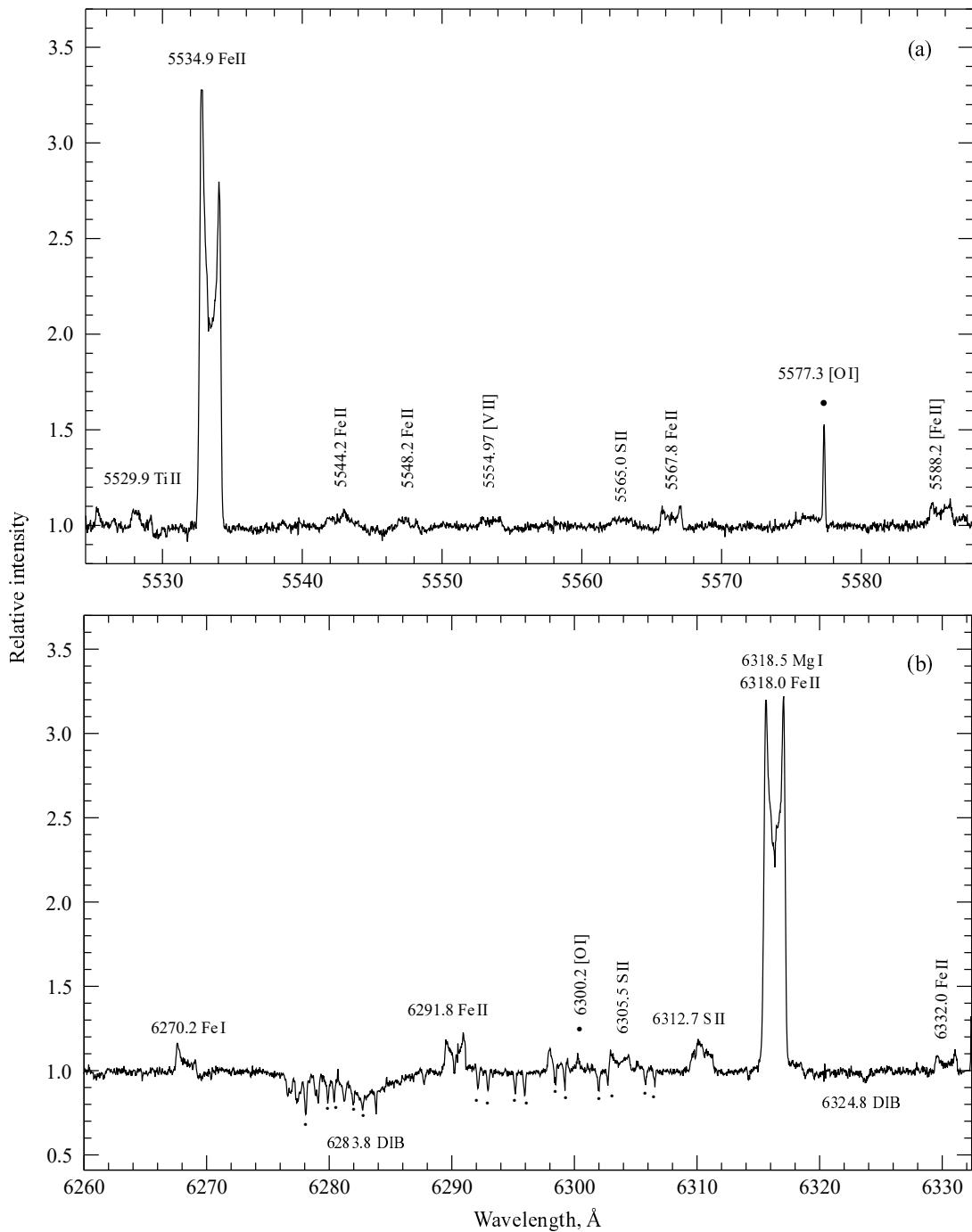


Рис. 3. Фрагменты с теллурическими эмиссиями [OI] 5577 (а) и 6300 Å (б).

работе Miroshnichenko (1995). Позже оно подтвердилось (Klochkova et al., 2024) обнаружением в спектрах 2019–2023 гг. небольшой выборки фотосферных абсорбций Fe III, N II, Ti II и S II с переменным положением, однако для принятия этого результата очевидна необходимость многократного увеличения объема высококачественных спектров. В спектре 2015 г., использованном в создании атласа, фотосферные абсорбции не найдены.

Вкратце остановимся на сложном профиле D-линий Na I (рис. 8б). Комплексный профиль каждой линии дублета включает две межзвездные абсорбции: со скоростями -7.1 ± 0.5 и $-5.8 \pm 0.3 \text{ км с}^{-1}$, а также околозвездную эмиссию. Точное положение эмиссии указать невозможно, поскольку ее профиль искажен абсорбционными компонентами. Согласно данным Klochkova et al. (2024), положение всех компонент

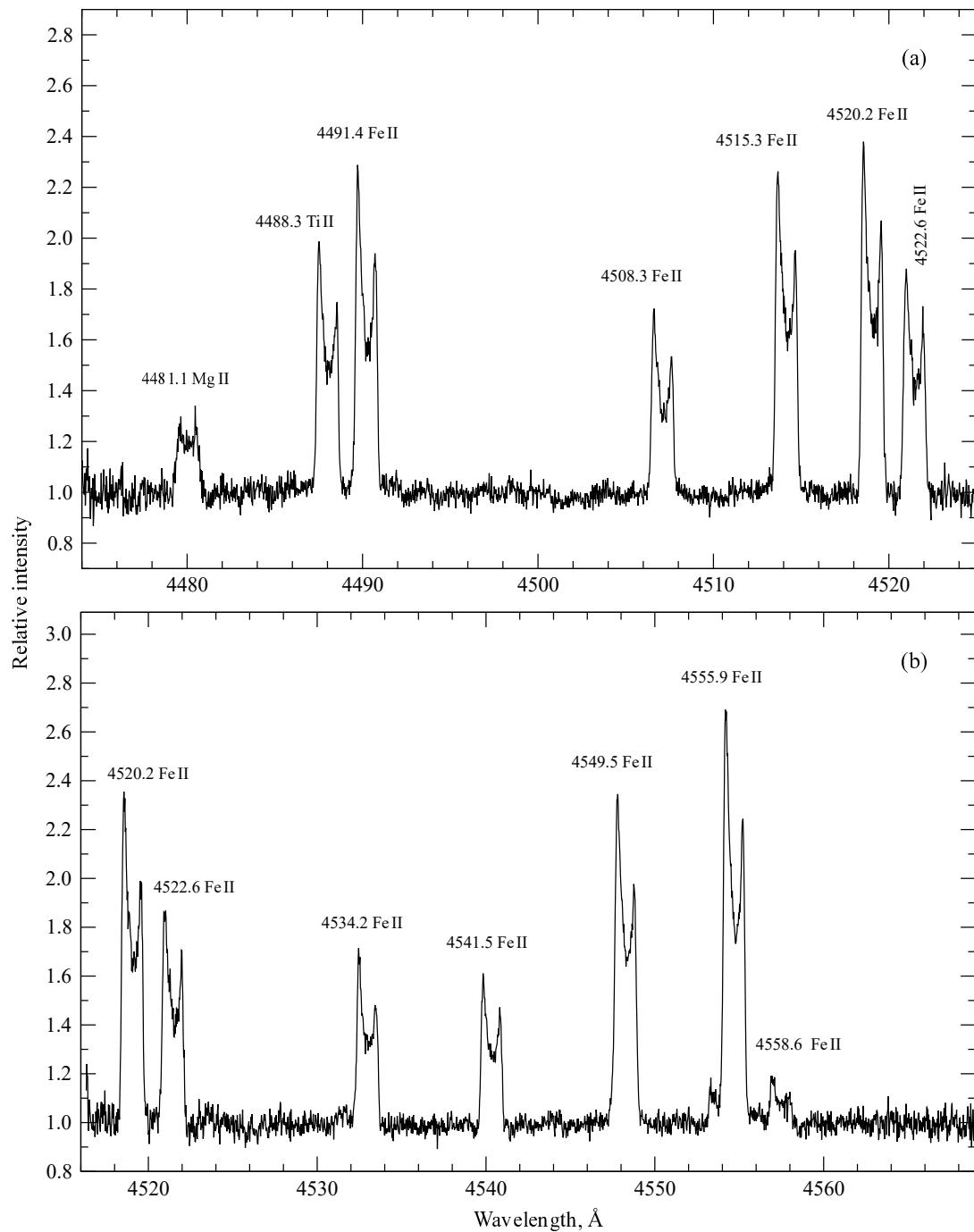


Рис. 4. Фрагменты спектра с эмиссиями ионов Mg II, Ti II, Fe II.

дублета стабильно, а положение двух межзвездных аборсций согласуется с положением компонент межзвездного калия K I 7696 Å.

Наряду с упомянутой звездой 3 Pup, близким аналогом CI Cam можно считать удаленную горячую звезду MWC 17 с феноменом B[e] (Klochkova and Chentsov, 2016). Ее стабильный спектр содержит примерно тот же набор эмиссий: H I, He I, разрешенные и запрещенные эмиссии ионов. Как

и в спектре CI Cam, в спектре MWC 17 не были найдены фотосферные аборсции (Klochkova and Chentsov, 2016). Отсутствие фотосферных линий может быть следствием быстрого вращения звезды совместно с сильным околозвездным континуумом, выалирующим аборсции. Экстремальная интенсивность H α в ее спектре известна со времени регистрации первых спектральных данных (Zickgraf, 2003). При этом, согласно результатам Klochkova

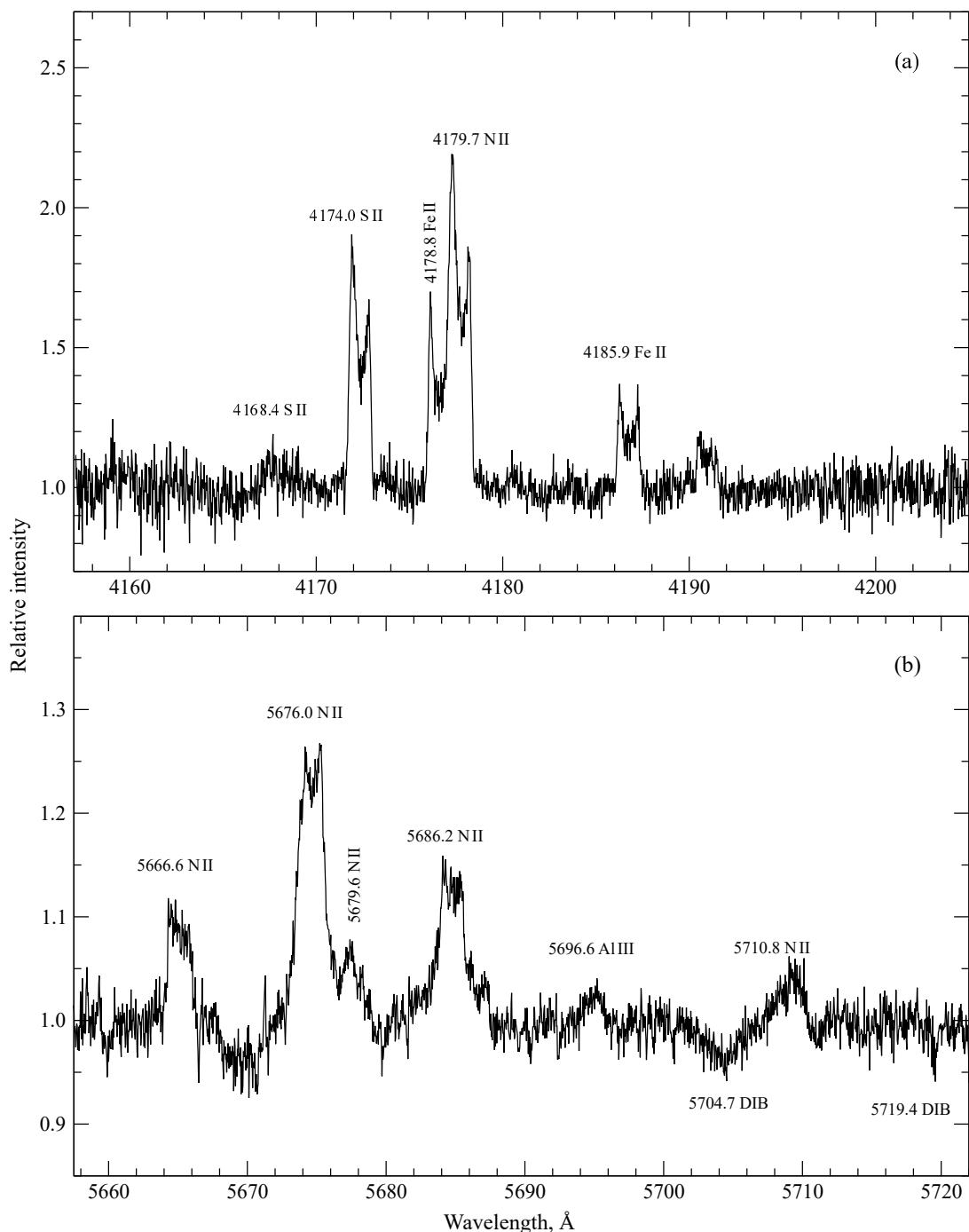


Рис. 5. Фрагменты спектра с разрешенными эмиссиями иона N II.

and Chentsov (2016), в спектре MWC 17 нет эмиссий с вертикальными склонами. Klochkova and Chentsov (2016) отметили разделенность профиля $\text{H}\alpha$ абсорбцией, но переменность ее положения на профиле не была найдена. Интенсивность профилей (Fe II, [Fe II], [O III] и т.п.) многократно превышает их интенсивность в спектре CI Cam. В спектре MWC 17 нет того изобилия эмиссий азота, которое было обнаружено в спектре CI Cam, присут-

ствуют лишь три известные запрещенные детали [N II], причем интенсивность эмиссии [N II] 5755 Å в 5.5 раз превышает интенсивность этой линии в спектре CI Cam. Основная проблема, требующая решения для этой пары и других родственных звезд со сложными оболочками, — это определение их удаленности и светимости.

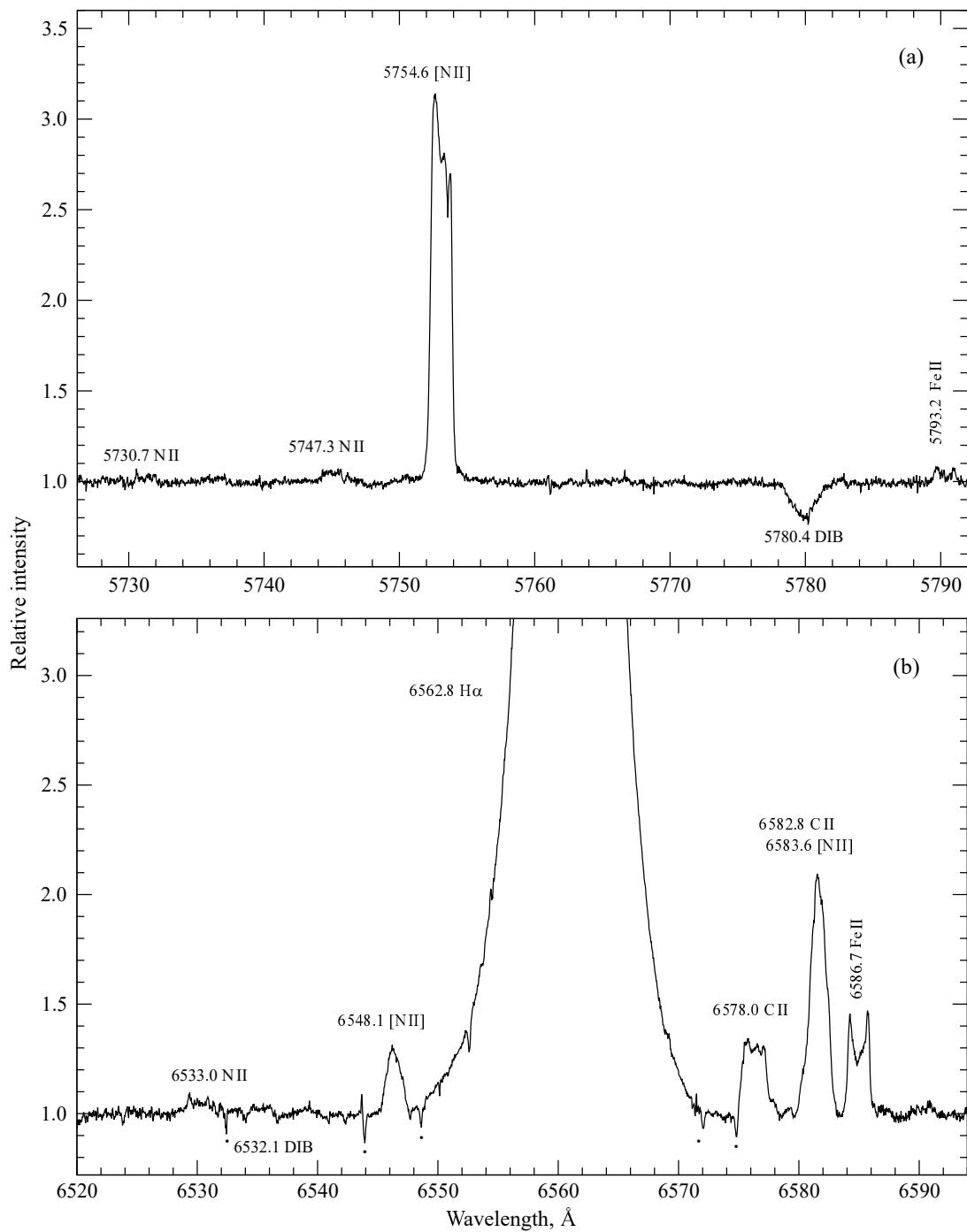


Рис. 6. Фрагменты спектра с разрешенными и запрещенными эмиссиями ионизованного азота.

4. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Мы представляем подготовленный атлас оптического спектра B[e]-звезды CI Cam (см. рис. 9) и результаты детального отождествления спектра в интервале длин волн 395–780 нм. Атлас является необходимым приложением к исследованию спектра CI Cam, выполненному Klochkova et al. (2024). Совокупность деталей, наблюдаемых в оптическом спектре CI Cam, позволяет рассматривать ее как

обнаженное (stripped) ядро звезды, потерявшей в ходе эволюции собственную атмосферу и окруженной комплексной газопылевой оболочкой. Излучение этого горячего ядра обеспечивает непрерывный спектр CI Cam. Все эмиссии в наблюдаемом оптическом спектре формируются в комплексной оптически тонкой оболочке. В атласе отождествлено подавляющее большинство (около 400) деталей с пекулярными профилями различных типов. В част-

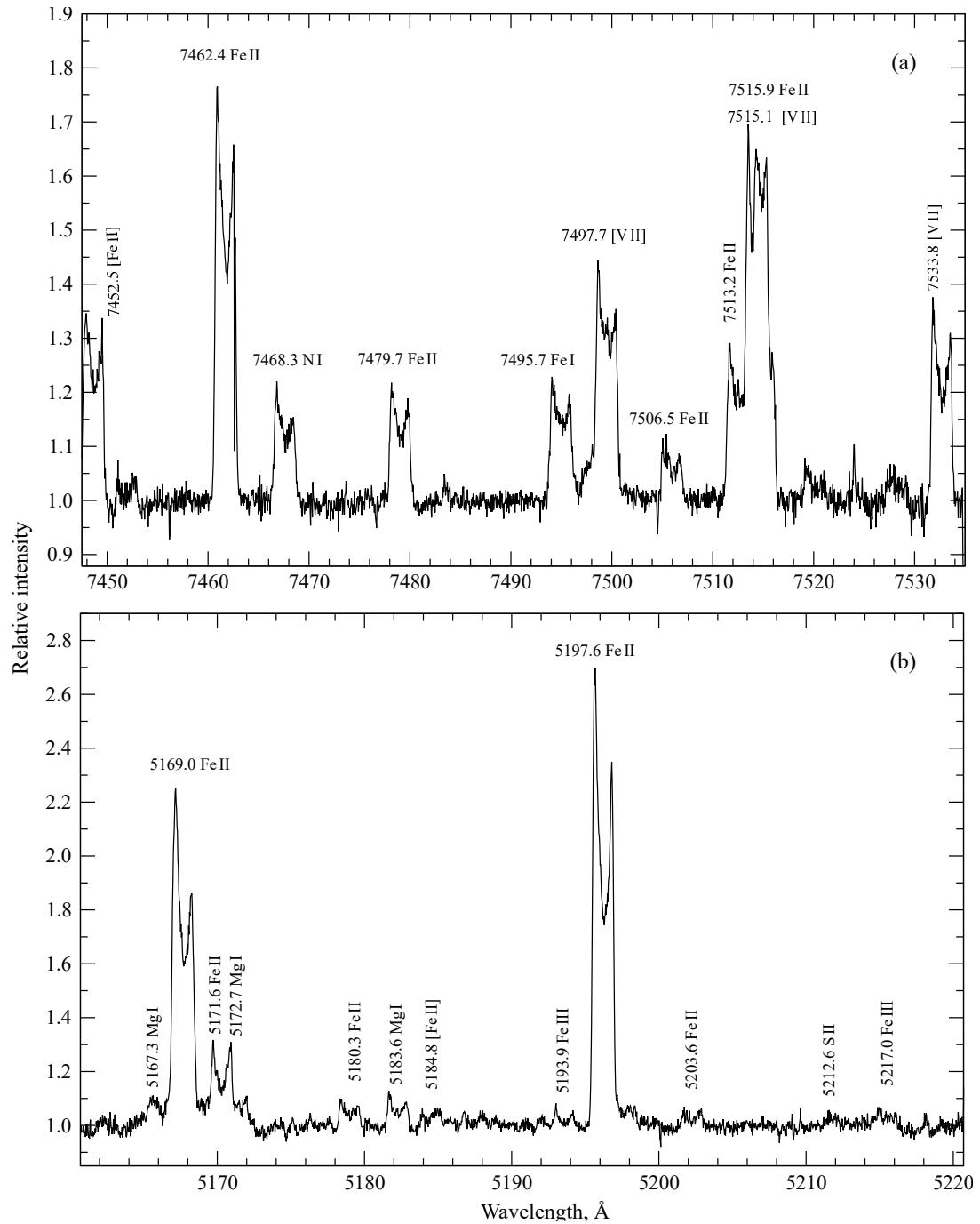


Рис. 7. Эмиссии атома NI (а) и триплета Mg I (б).

ности, отметим обнаружение двухпиковых запрещенных эмиссий ионов [V II] и [Cr II] нескольких мультиплетов.

Высокое качество наблюдательных данных дает нам основание надеяться на будущее использование результатов этой работы в спектроскопии CI Cam и других горячих звезд с комплексными газопылевыми оболочками и с B[e]-феноменом в спектрах (Magavelias et al., 2018; Miroshnichenko et al., 2020), а также ряда горячих звезд с неясным

эволюционным статусом (Klochkova and Chentsov, 2004; Miroshnichenko et al., 2021; Klochkova et al., 2022a; Bakhytkyzy et al., 2025). Очевидна пригодность результатов детальной спектроскопии и в исследованиях изображений околозвездной пространственной структуры (Liimets et al., 2022). Атлас может быть также полезен для изучения спектров редко встречающегося типа звезд — сверхгигантов с экстремальным дефицитом водорода в составе двойных систем с общей оболочкой.

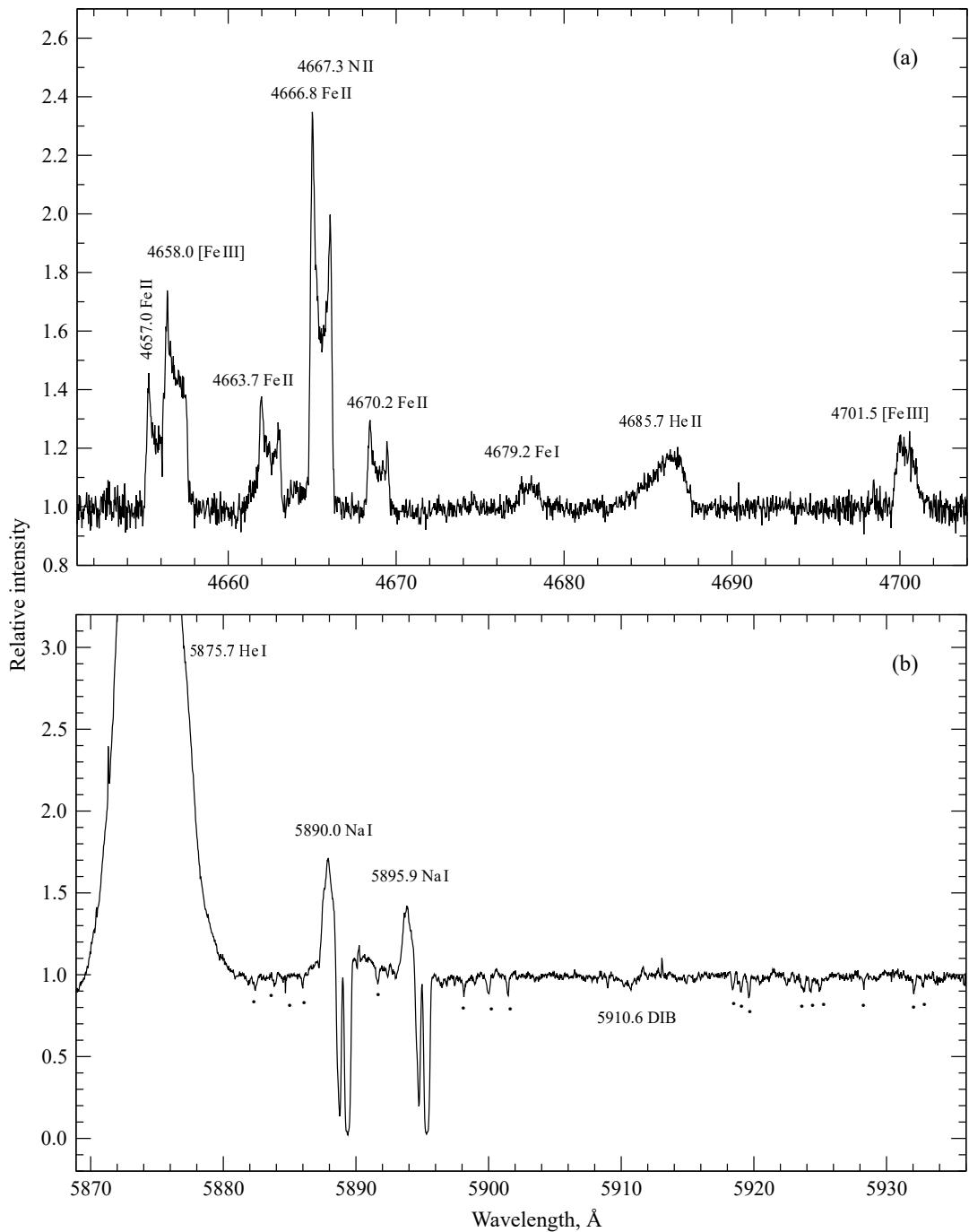


Рис. 8. Фрагменты спектра CI Cam с эмиссией вблизи $\lambda 4686 \text{ \AA}$ и с дублетом D-линий Na I, панели (а) и (б) соответственно.

Примерами могут быть горячие звезды v Sgr (Kipper and Klochkova, 2008) и KS Per (Kipper and Klochkova, 2012) с аккреционными дисками в тесных двойных системах с большим дефицитом водорода (HdBs), которые считаются предшественниками сверхновых типа SN Ia. Множество подобных особенностей содержит и спектры маломассивных post-AGB сверхгигантов на завершении перехода к стадии планетарной туманности. Отличным

примером является горячая звезда в системе ИК-источника IRAS 01005+7910 (Klochkova et al., 2014), в оптическом спектре которой отождествлены запрещенные эмиссии [N I], [N II], [O I], [S II] и [Fe II]. Наличие запрещенных эмиссий [N II] и [S II] указывает на начало ионизации околосзвездной оболочки и близость фазы планетарной туманности. Близкое сочетание особенностей выявлено и в спектре удаленного B-сверхгиганта

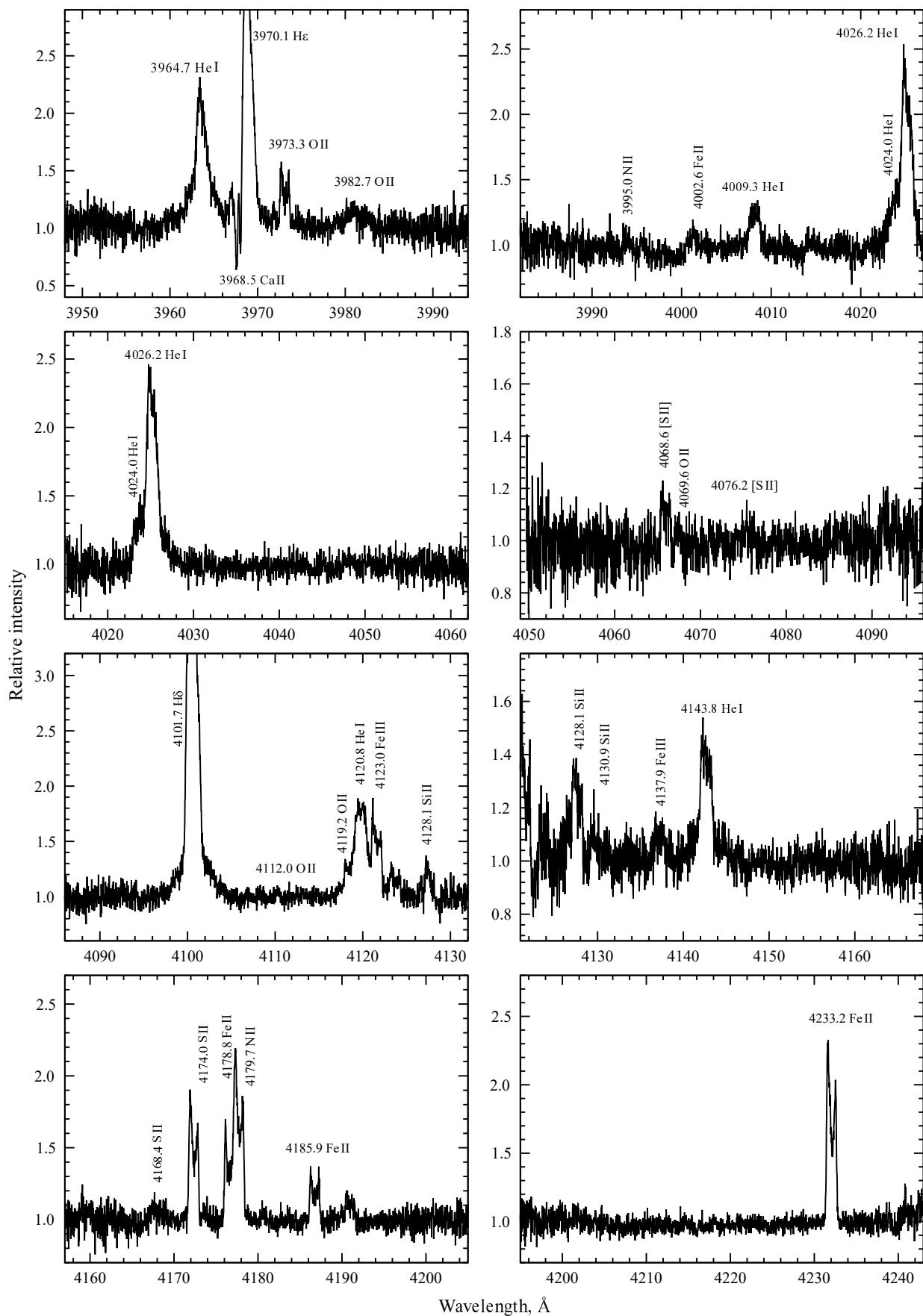


Рис. 9. Спектр CI Сам: фрагменты 1–8.

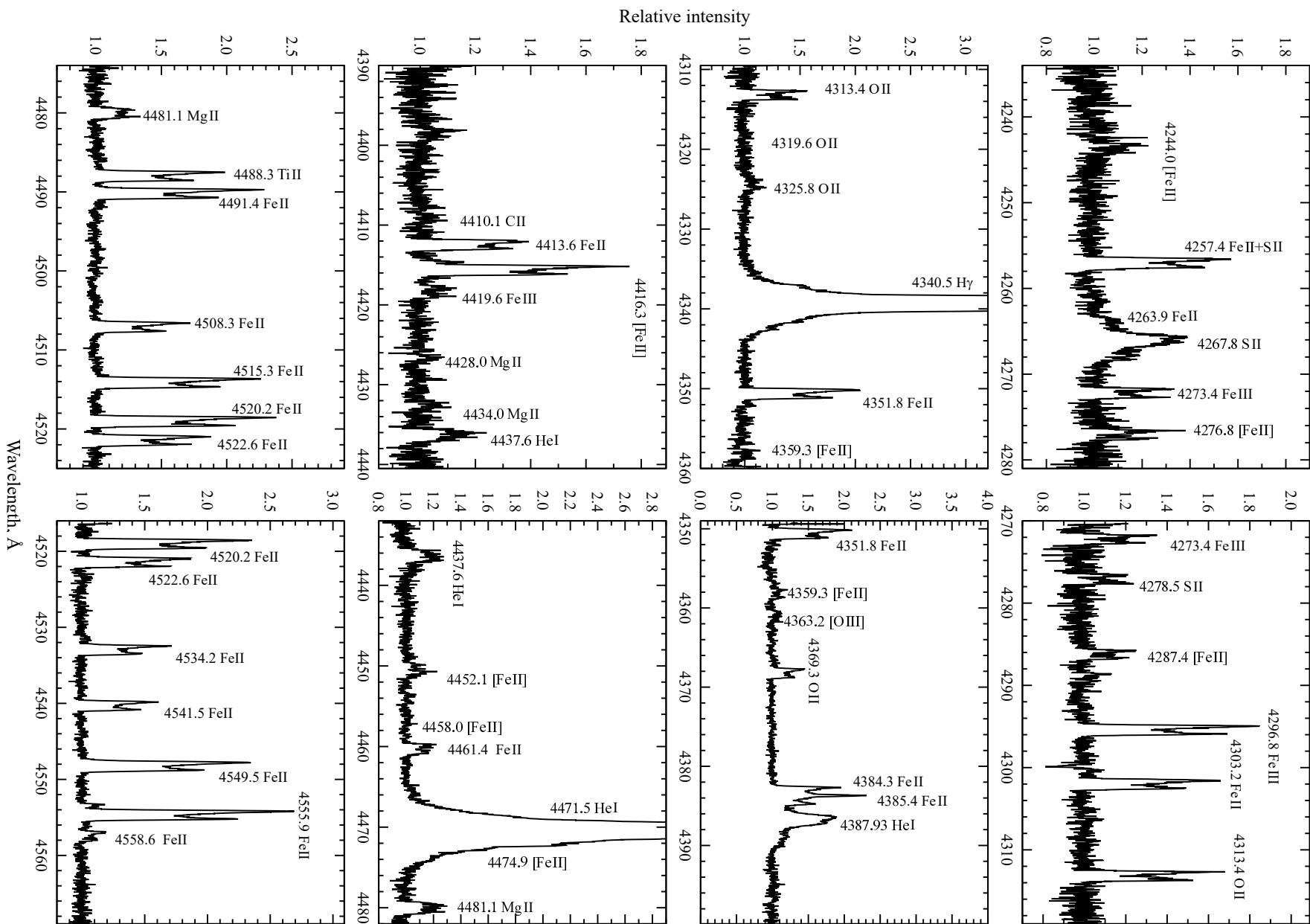


Рис. 9. Спектр C1Cam: фрагменты 9–16.

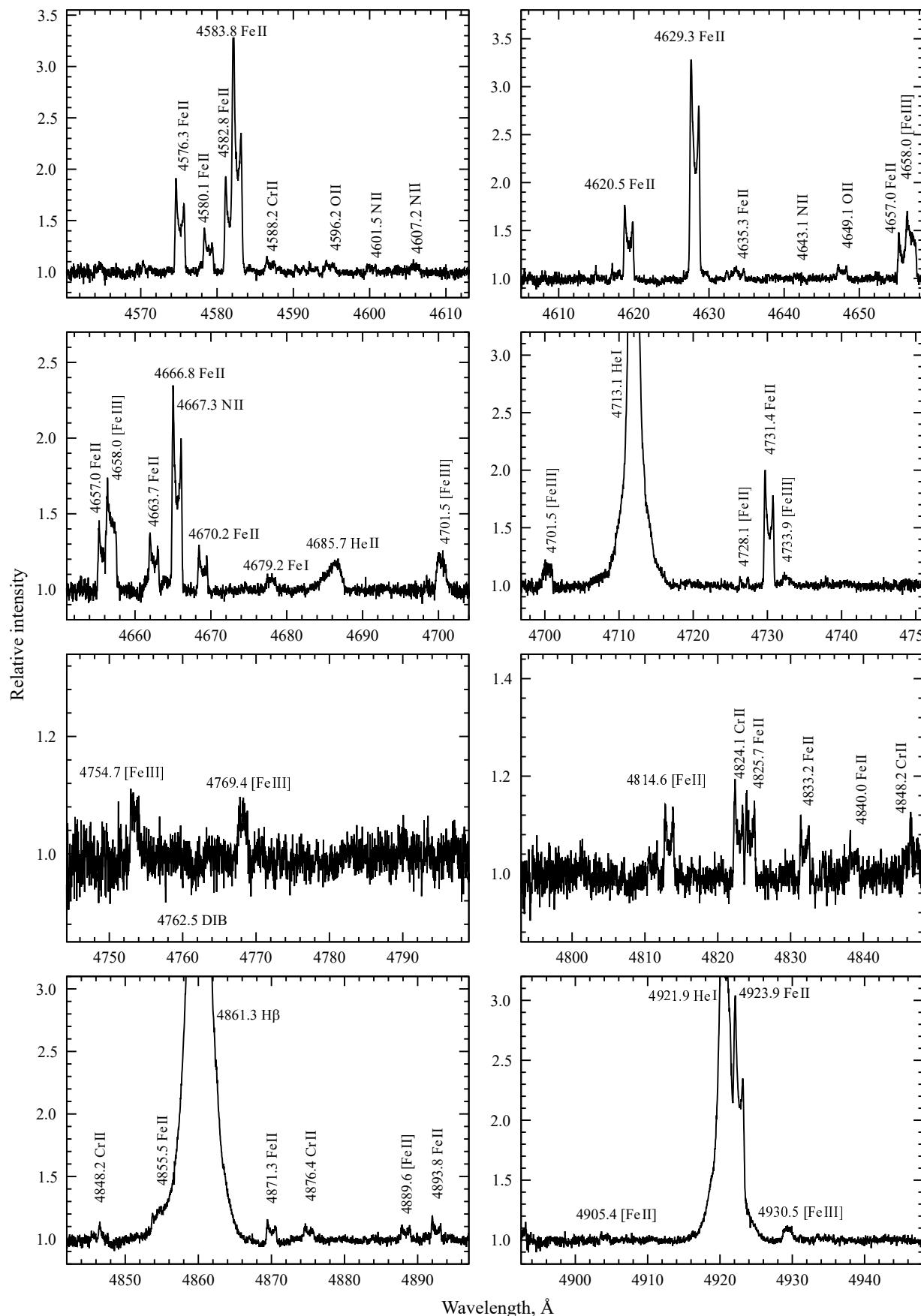


Рис. 9. Спектр CI Сам: фрагменты 17–24.

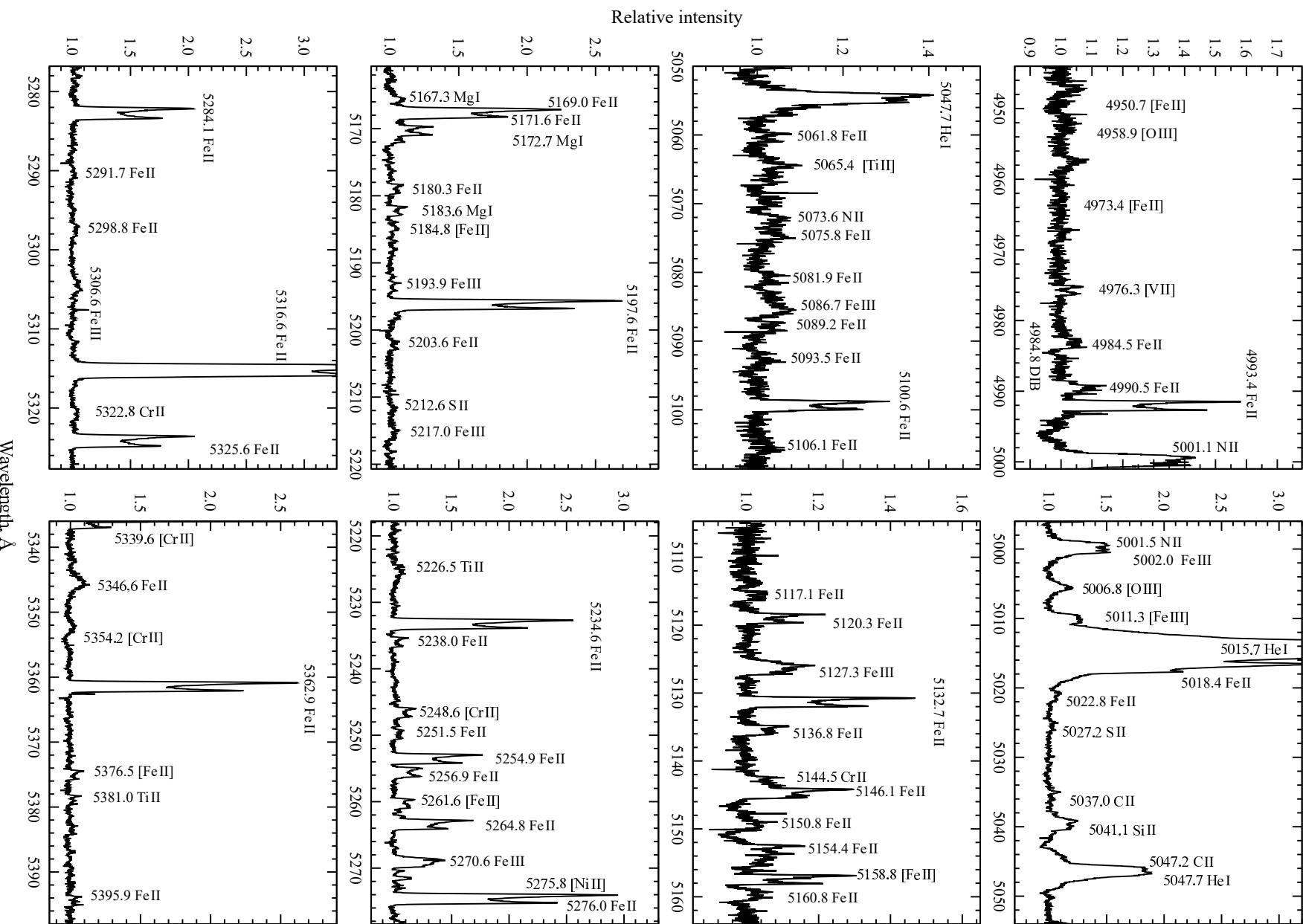


Рис. 9. Спектр C1Cam: фрагменты 25–32.

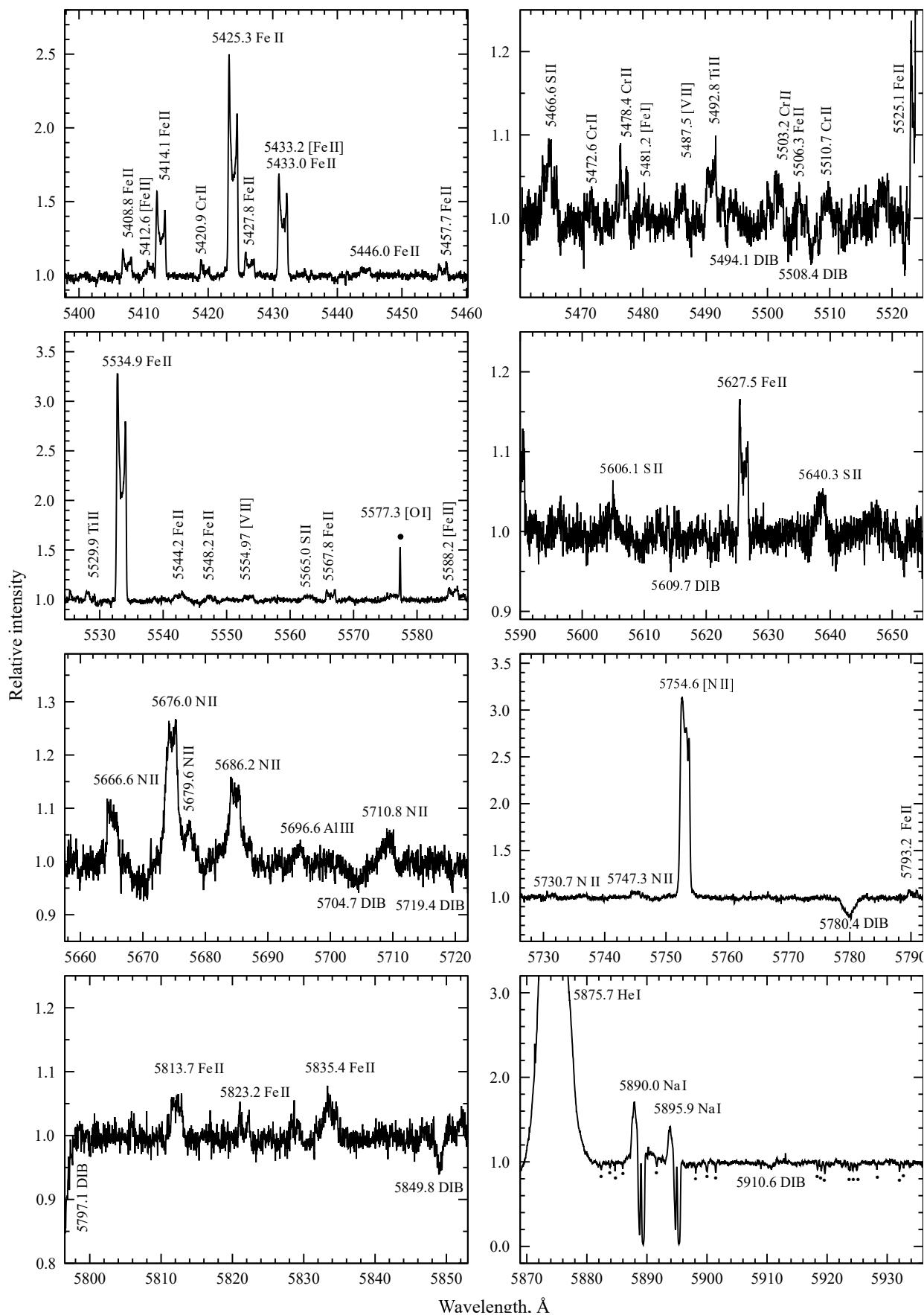


Рис. 9. Спектр CI Сам: фрагменты 33–40.

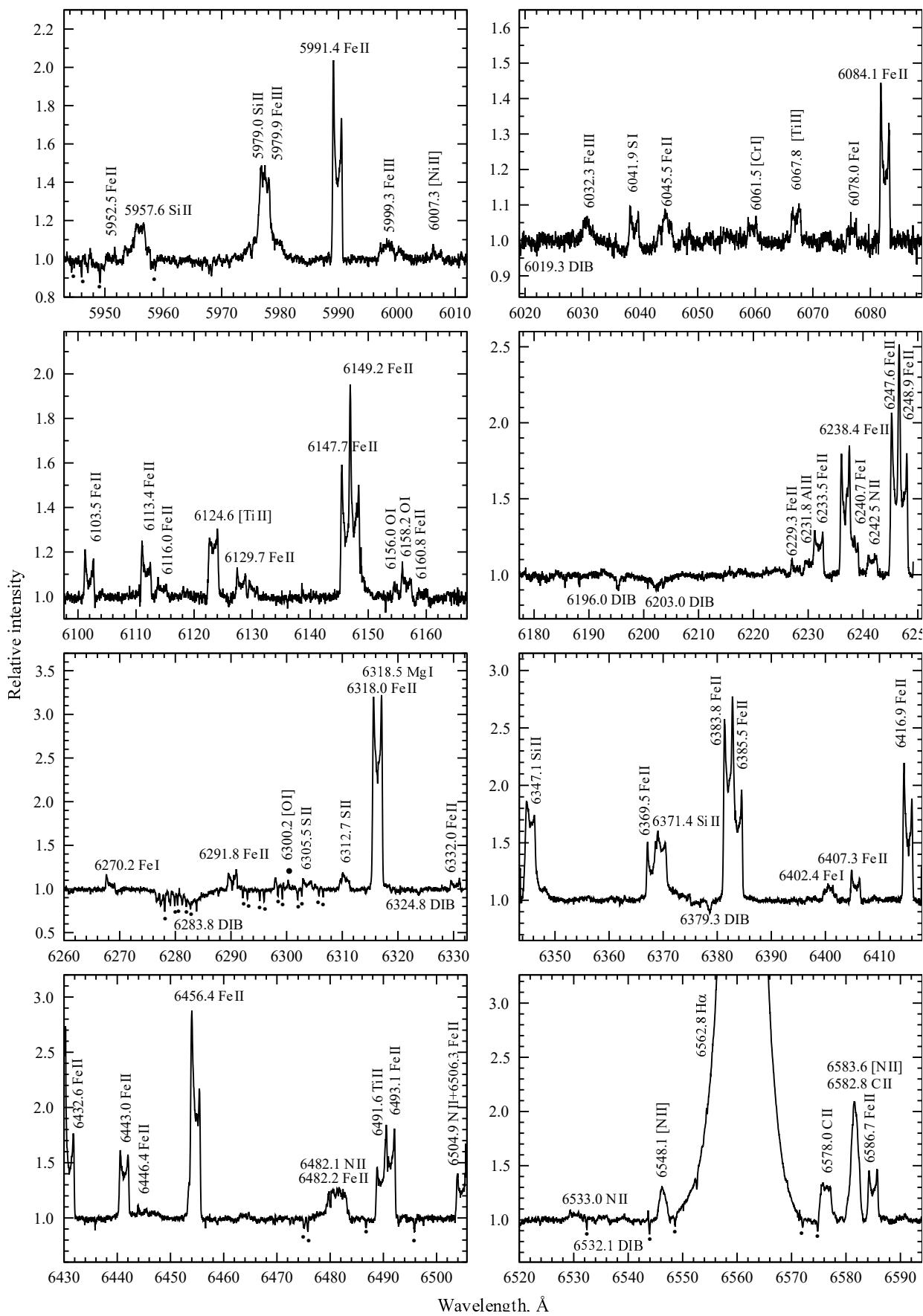


Рис. 9. Спектр CI Cam: фрагменты 41–48.

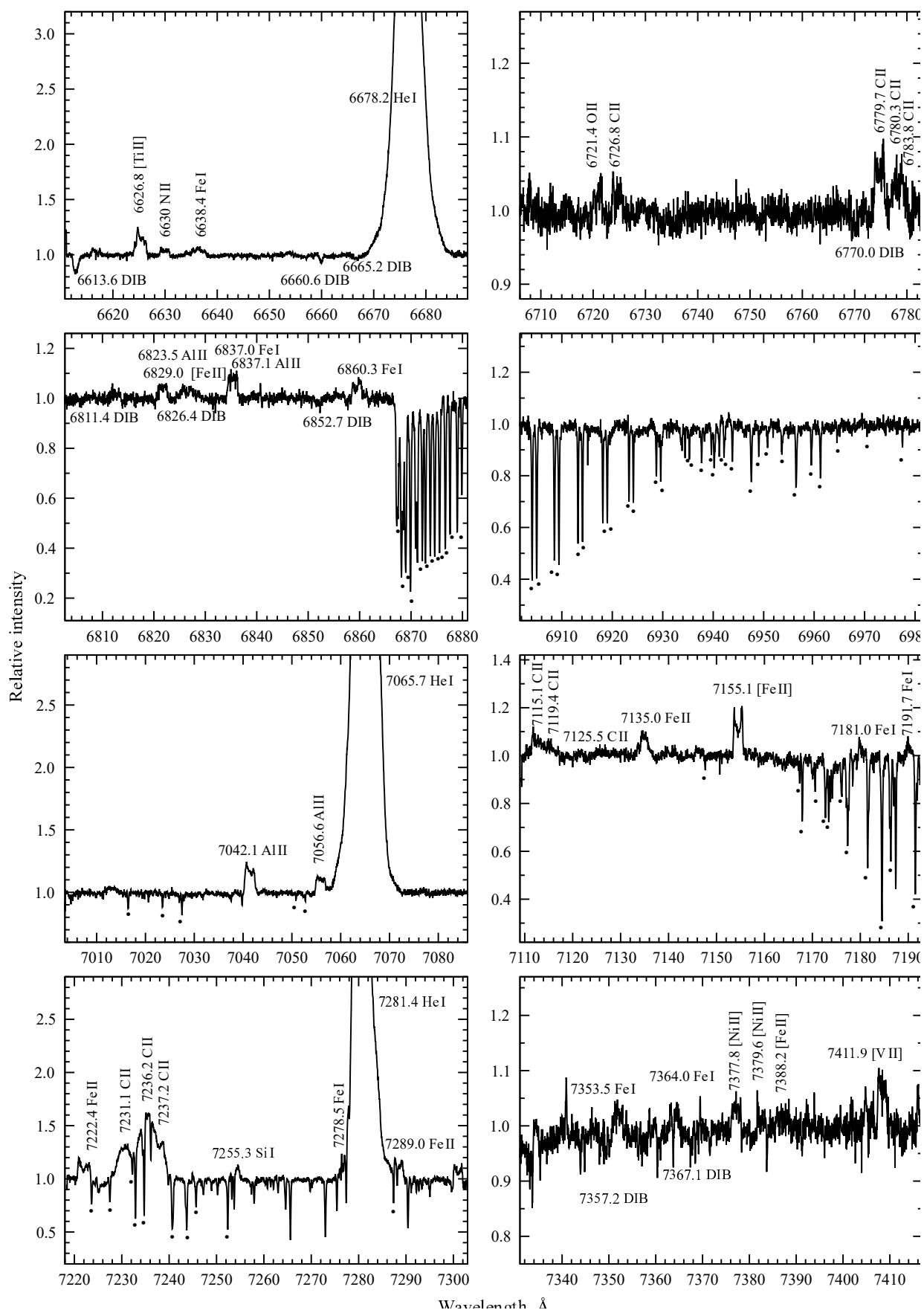


Рис. 9. Спектр CI Сам: фрагменты 49–56.

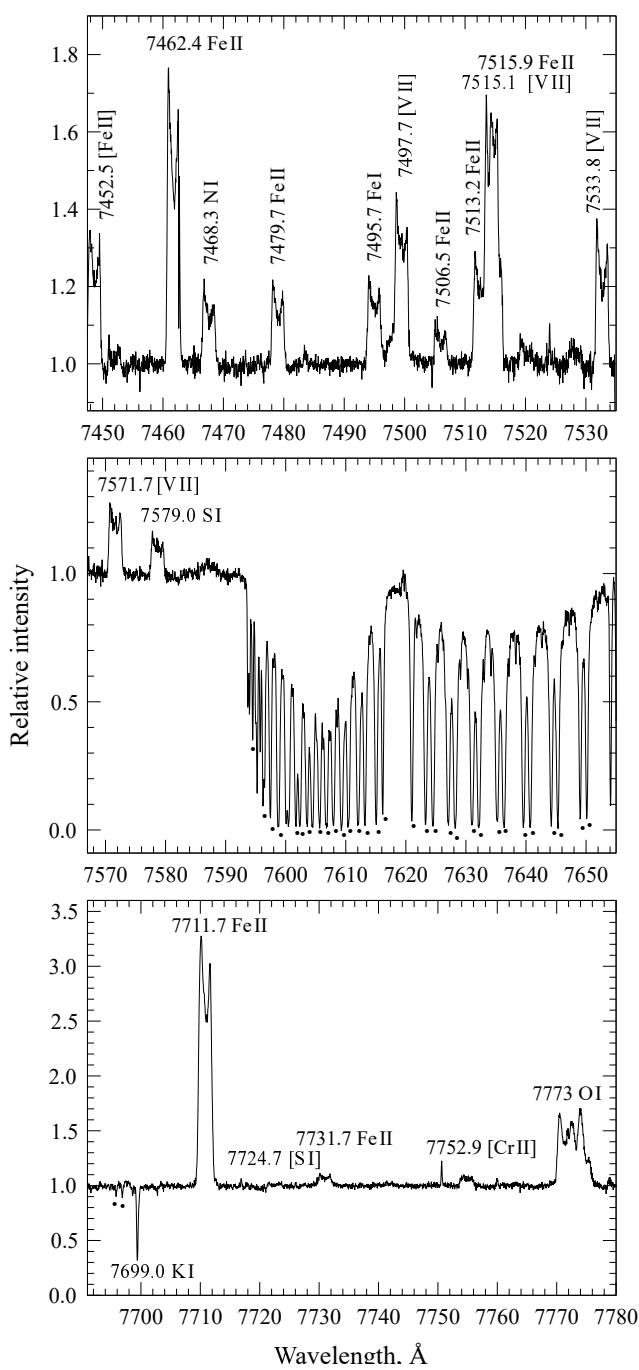


Рис. 9. Спектр CI Cam: фрагменты 57–59.

LS III+52°24 (Klochkova et al., 2022b) с не вполне ясным статусом. Эта звезда — рекордсмен по интенсивности эмиссии $\text{H}\alpha$, достигающей значений $I/I_{\text{cont}} \geq 70$. Линии $\text{H}\alpha$ и $\text{H}\beta$ имеют профиль типа R Cyg, их ветровая абсорбционная компонента меняет положение в интервале $V_{\odot} = -(270 \div 290) \text{ км с}^{-1}$. Спектр содержит многочисленные разрешенные (O I , Si III , Al III , C II , Fe I , Fe II , Fe III) и запрещенные эмиссии

низкого возбуждения ($[\text{N II}]$, $[\text{O I}]$, $[\text{S II}]$). За счет наблюдений на БТА + НЭС в произвольные даты 2010–2021 гг. выявлены признаки переменности ветра и стратификация скорости в протяженной атмосфере. По положениям абсорбций N II и O II найдена переменность со временем лучевой скорости в интервале $V_{\odot} = -(127.2 \div 178.3) \text{ км с}^{-1}$, что указывает на присутствие компаньона и (или) на пульсации в атмосфере.

Благодаря высокому качеству спектральных данных в атласе и в работе Robinson et al. (2002) мы смогли сделать корректное сопоставление профилей узких дисковых эмиссий для двух разделенных во времени этапов спектроскопии звезды. Выявлено снижение интенсивности эмиссии $[\text{O I}] 5577 \text{ \AA}$ и изменение формы вершин эмиссий ионов Ti II , Cr II , Fe II ; их профили с округленными после вспышки вершинами приобрели двухпиковый вид, что свидетельствует о реальности различий физических условий в области формирования дисковых эмиссий сразу после вспышки и спустя 17 лет.

Остается не вполне определенным и поведение эмиссии высокого возбуждения вблизи $\lambda 4686 \text{ \AA}$. В связи с этой проблемой интересно изображение в фильтрах $[\text{O III}]$ и $\text{H}\alpha$ эмиссионной оболочки остатка сверхновой G150.3+4.5, центрированной на CI Cam, недавно полученное в работе Fesen et al. (2024). К сожалению, отсутствие сведений об удаленности RSN G150.3+4.5 пока не позволяет говорить о физической взаимосвязи оболочки сверхновой и CI Cam.

БЛАГОДАРНОСТИ

Наблюдения на телескопах САО РАН выполняются при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках государственного задания САО РАН, утвержденного Министерством науки и высшего образования Российской Федерации.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. D. A. Allen and J. P. Swings, *Astron. and Astrophys.* **47**, 293 (1976).
2. A. Aret, M. Kraus, and M. Šlechta, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **456** (2), 1424 (2016). DOI:10.1093/mnras/stv2758
3. A. Bakhytkyzy, A. S. Miroshnichenko, V. G. Klochkova, et al., *Galaxies* **13** (2), id. 17 (2025). DOI:10.3390/galaxies13020017
4. E. S. Bartlett, J. S. Clark, and I. Negueruela, *Astron. and Astrophys.* **622**, id. A93 (2019). DOI:10.1051/0004-6361/201834315
5. E. L. Chentsov, V. G. Klochkova, and A. S. Miroshnichenko, *Astrophysical Bulletin* **65** (2), 150 (2010). DOI:10.1134/S1990341310020057
6. J. S. Clark, A. S. Miroshnichenko, V. M. Larionov, et al., *Astron. and Astrophys.* **356**, 50 (2000).
7. R. A. Fesen, M. Drechsler, N. Martino, and Y. Sainty, *Res. Notes Amer. Astron. Soc.* **8** (5), id. 129 (2024). DOI:10.3847/2515-5172/ad4971
8. G. A. Galazutdinov, *Astrophysical Bulletin* **77** (4), 519 (2022). DOI:10.1134/S1990341322040034
9. T. Kipper and V. G. Klochkova, *Baltic Astronomy* **17**, 195 (2008). DOI:10.48550/arXiv.0806.2709
10. T. Kipper and V. G. Klochkova, *Baltic Astronomy* **21**, 219 (2012). DOI:10.1515/astro-2017-0382
11. V. G. Klochkova and E. L. Chentsov, *Astronomy Reports* **48** (12), 1005 (2004). DOI:10.1134/1.1836024
12. V. G. Klochkova and E. L. Chentsov, *Astrophysical Bulletin* **71** (1), 33 (2016). DOI:10.1134/S1990341316010041
13. V. G. Klochkova, E. L. Chentsov, V. E. Panchuk, et al., *Astrophysical Bulletin* **69** (4), 439 (2014). DOI:10.1134/S1990341314040063
14. V. G. Klochkova, E. S. Islentieva, and V. E. Panchuk, *Astronomy Reports* **66** (11), 998 (2022a). DOI:10.1134/S1063772922110099
15. V. G. Klochkova, A. S. Miroshnichenko, and V. E. Panchuk, *Astronomy Reports* **68** (6), 583 (2024). DOI:10.1134/S1063772924700501
16. V. G. Klochkova, A. S. Miroshnichenko, V. E. Panchuk, et al., *Astronomy Reports* **66** (5), 429 (2022b). DOI:10.1134/S1063772922060051
17. M. Kraus, *Galaxies* **7** (4), id. 83 (2019). DOI:10.3390/galaxies7040083
18. F. Kupka, N. Piskunov, T. A. Ryabchikova, et al., *Astron. and Astrophys. Suppl.* **138**, 119 (1999). DOI:10.1051/aas:1999267
19. T. Liimets, M. Kraus, A. Moiseev, et al., *Galaxies* **10** (2), id. 41 (2022). DOI:10.3390/galaxies10020041
20. G. Maravelias, M. Kraus, A. Aret, et al., *ASP Conf. Ser.* **508**, 213 (2017).
21. G. Maravelias, M. Kraus, L. S. Cidale, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **480** (1), 320 (2018). DOI:10.1093/mnras/sty1747
22. A. S. Miroshnichenko, *Astronomical and Astrophysical Transactions* **6** (4), 251 (1995). DOI:10.1080/10556799508232071
23. A. S. Miroshnichenko, S. Danford, S. V. Zharikov, et al., *Astrophys. J.* **897** (1), id. 48 (2020). DOI:10.3847/1538-4357/ab93d9
24. A. S. Miroshnichenko, V. G. Klochkova, K. S. Bjorkman, and V. E. Panchuk, *Astron. and Astrophys.* **390**, 627 (2002). DOI:10.1051/0004-6361:20020798
25. A. S. Miroshnichenko, V. G. Klochkova, E. L. Chentsov, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **507** (1), 879 (2021). DOI:10.1093/mnras/stab2193
26. A. S. Miroshnichenko, S. V. Zharikov, N. Manset, et al., *Galaxies* **11** (1), id. 36 (2023). DOI:10.3390/galaxies11010036
27. C. E. Moore, *Contributions from the Princeton University Observatory* **20**, 1 (1945).
28. V. E. Panchuk, V. G. Klochkova, and M. V. Yushkin, *Astronomy Reports* **61** (9), 820 (2017). DOI:10.1134/S1063772917080091
29. E. L. Robinson, I. I. Ivans, and W. F. Welsh, *Astrophys. J.* **565** (2), 1169 (2002). DOI:10.1086/324715
30. M. V. Yushkin and V. G. Klochkova, Preprint No. 206, SAO RAS (Spec. Astrophys. Obs., Nizhny Arkhyz, 2005).
31. F. J. Zickgraf, *Astron. and Astrophys.* **408**, 257 (2003). DOI:10.1051/0004-6361:20030999
32. F. J. Zickgraf, B. Wolf, O. Stahl, et al., *Astron. and Astrophys.* **143**, 421 (1985).

B[e] star CI Cam: a High-Resolution Spectrum Atlas in the Range of 395–780 nm**V. G. Klochkova¹, A. S. Miroshnichenko^{2,3}, V. N. Komarova¹, and N. S. Tavolzhanskaya¹**¹ Special Astrophysical Observatory of the Russian Academy of Sciences, Nizhnii Arkhyz, 369167 Russia² University of North Carolina, Greensboro, NC 27402, USA³ Fesenkov Astrophysical Institute, Almaty 050020, Kazakhstan

The atlas of the spectrum of the B[e] star CI Cam obtained with the 6-m BTA telescope of the SAO RAS applying the NES spectrograph in the wavelength range of 395–780 nm with a resolution of $\lambda/\Delta\lambda \geq 60\,000$ is presented. The atlas identifies about 400 spectral features and illustrates the diversity of spectral features of the unique star, forming in a complex circumstellar environment. The spectrum is dominated by forceful single-peaked H I, He I emissions and numerous double-peaked permitted and forbidden emission lines of ions of chemical elements starting from the CNO triad up to metals (Mg, Al, Ti, V, Cr, Fe) with “rectangular” profiles. The Fe II and [Fe II] emissions predominate in the spectrum. However, several double-peaked forbidden ion emissions were also detected: [V II], [Cr II], [Ni II]. The atlas is presented graphically, with a separate figure corresponding to each echelle order. A list of identified lines, including a number of known interstellar features is presented in table form. CI Cam’s supergiant status has been confirmed.

Keywords: *techniques: spectroscopic—stars: emission-line, Be—stars: individual: CI Cam*