

УДК 524.333-36:520.84

ПРОЕКТ MAGIC. I. СПЕКТРОСКОПИЯ ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ НА ТЕЛЕСКОПЕ SALT И ЦЕФЕИДА RS NOR КАК ТЕСТОВЫЙ ОБЪЕКТ

© 2019 А. Ю. Князев^{1,2,3,4*}, И. А. Усенко^{5,6}, В. В. Ковтюх⁵, Л. Н. Бердников⁴

¹Южно-Африканская астрономическая обсерватория, Кейптаун, 7935 Южная Африка

²Южный Африканский Большой Телескоп, Кейптаун, 7935 Южная Африка

³Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

⁴Государственный астрономический институт им. П. К. Штернберга Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, Москва, 119991 Россия

⁵Астрономическая обсерватория Одесского национального университета, Одесса, 65014 Украина

⁶Николаевская астрономическая обсерватория, Николаев, 54030 Украина

Поступила в редакцию 30 ноября 2018 года; после доработки 15 февраля 2019 года;
принята к публикации 15 февраля 2019 года

В статье приведено краткое описание большого наблюдательного проекта MAGIC, направленного на массовые спектральные исследования звезд различных подсистем нашей Галактики. Проект выполнен на Южном Африканском Большом Телескопе (далее — SALT) при эффективном использовании его возможностей, астроклимата и спектральной аппаратуры. Подробно рассмотрены вопросы спектроскопии высокого разрешения при исследовании химического состава цефеид Галактики. Наблюдения этих объектов с помощью эшелле-спектрографа HRS телескопа SALT были начаты в 2016 г. и в настоящее время их количество превышает сотню. Спектры получены в режиме среднего разрешения ($R \sim 36\,500\text{--}39\,000$) с высоким отношением сигнал/шум ($S/N \sim 50\text{--}220$). Для обработки полученных спектральных изображений использован пакет, созданный авторами на основе стандартной системы MIDAS. Приводится описание стандартных шагов обработки. В качестве тестового объекта взята классическая цефеида RS Nor. По данным спектральных наблюдений авторы определили параметры атмосферы и содержания для 31 химического элемента (36 нейтральных атомов и ионов), линии поглощения которых наблюдаются в спектре RS Nor. Все расчеты сделаны двумя разными методами. Показано, что эшелле-спектры, полученные в режиме среднего разрешения (MR) спектрографа HRS, позволяют изучать химический состав цефеид с хорошими точностями, а результаты в пределах ошибок совпадают с результатами других работ.

Ключевые слова: *методы: анализ данных — звезды: переменные: цефеиды — звезды: атмосферы — звезды: химический состав — звезды: индивидуальные: RS Nor*

1. ВВЕДЕНИЕ

Телескоп SALT [1, 2] имеет 11-м составное зеркало и является по этому параметру самым крупным телескопом в южном полушарии. Телескоп построен по необычной оптической схеме: угол между направлением на зенит и направлением главной оптической оси телескопа является неизменным, а азимутальный угол телескопа может меняться. Слежение за движением ночного неба осуществляется с помощью перемещающейся каретки первичного фокуса (тракера), и «зона видимости» объекта ограничена 12 градусами. Указанные особенности оптической схемы инструмента приводят к тому, что в любой конкретный

момент времени возможны наблюдения только тех объектов, которые находятся на небе в достаточно узком кольце шириной 12° . Максимальное время слежения за объектом равно примерно одному часу для всех склонений, кроме $-5 < \text{Dec} < 5$ и $-70 < \text{Dec} < -60$, когда это время увеличивается до нескольких часов. Область рабочих склонений телескопа от -75° до 10° . Эта особенность обуславливает большую эффективность выполнения на телескопе наблюдательных программ, включающих значительное число объектов, достаточно равномерно расположенных по всему небу: в любой момент времени один или несколько объектов будут доступны для наблюдений.

Благодаря конструкции инструмента при наблюдениях конкретного астрономического объ-

*E-mail: akniazev@sao.ac.za

екта (когда движется только тракер) все время «работают» разные части сферического зеркала, поэтому в конечном результате SALT эквивалентен телескопу с диаметром первичного зеркала 7.8–9.2 м (в зависимости от траектории движения объекта). Эти особенности конструкции приводят к невозможности абсолютной фотометрической калибровки и проблемам с плоскими полями для фотометрических наблюдений, поэтому SALT является спектральным телескопом. В настоящее время он оснащен двумя спектрографами: (1) спектрографом низкого и среднего спектрального разрешения Robert Stobie Spectrograph (RSS, $R = 300–12000$ [3, 4]) и (2) фиберным эшелле-спектрографом высокого разрешения High Resolution Spectrograph (HRS, $R = 15000–65000$ [5–8]). Во время наблюдений возможен выбор спектрографа и смена режима наблюдений на нем в течение минуты, а все наблюдения проводятся в сервисном режиме профессиональными операторами.

Телескоп установлен на территории Южно-Африканской астрономической обсерватории (SAAO) в пустыне Кару, недалеко от поселка Сазерланд (Sutherland), находящегося в 380 км северо-восточнее Кейптауна. Это место характеризуется очень хорошим астроклиматом и медианным качеством изображений около 1".5.

Проанализировав особенности телескопа SALT, возможности его спектральной аппаратуры, а также особенности астроклимата, мы предложили ряд наблюдательных программ, которые позволят использовать эти особенности максимально эффективно. Программы направлены на спектральное изучение различных звездных подсистем нашей Галактики, включают большие выборки звезд и объединены в один большой наблюдательный проект MAGIC — the Milky Way Galaxy with SALT spectroscopy.

В данной статье мы описываем одну из наблюдательных программ проекта MAGIC — спектроскопические исследования большой выборки цефеид с высоким разрешением. Общеизвестно, что по ряду причин желтые переменные сверхгиганты, именуемые цефеидами, являются очень удобными объектами для изучения поведения разных химических элементов в диске нашей Галактики, а именно:

- (1) эти сверхгиганты имеют большую светимость и поэтому могут наблюдаться на достаточно больших расстояниях и даже в областях с повышенным поглощением;
- (2) их эффективные температуры достаточно велики для того чтобы в спектрах цефеид были видны линии поглощения атомов многих элементов с

различными степенями ионизации, а также практически отсутствовали молекулярные полосы;

(3) вследствие небольших скоростей вращения цефеид в их спектрах наблюдаются достаточно узкие линии поглощения, которые удобны для определения содержаний различных химических элементов;

(4) для спектров звезд классов F–G хорошо разработаны методы определения химического состава, что гарантирует надежность получаемых результатов;

(5) цефеиды — звезды, до завершения эволюции которых еще далеко, и поэтому только содержания немногих элементов в их атмосфере (углерод, азот, кислород, натрий, магний, алюминий) могут измениться во время фазы крупномасштабных перемешиваний, именуемых «dredge-up»;

(6) являясь относительно молодыми звездами, цефеиды находятся не очень далеко от места своего рождения, поэтому содержания элементов в их атмосферах представляют практически «мгновенную» картину распределения химических элементов в диске нашей Галактики.

В течение последних 15 лет было опубликовано много работ, посвященных анализу химического состава цефеид и распределения содержаний химических элементов в диске Галактики на основе спектральных исследований (например, [9–17]). Тем не менее очень многие объекты остались неизученными, либо изученными недостаточно подробно, кроме того, возникли новые интересные проблемы, требующие объяснения.

В 2016 г. авторы начали наблюдательную программу, направленную на систематическое изучение градиента металличности и однородности локального химического состава в диске Галактики и основанную на эшелле-спектроскопии удаленных неисследованных цефеид южного неба. Однако при получении первого спектрального материала авторы столкнулись с проблемой отсутствия стандартной системы обработки получаемых на спектрографе HRS эшелле-данных и были вынуждены разработать собственную систему обработки.

В статье приведено краткое описание созданной системы обработки и тестирования получаемого спектрального материала на примере исследования одного объекта. Для этого была выбрана слабая классическая цефеида с уже исследованным ранее химическим составом — RS Nor. В разделе 2 данной статьи описаны получение данных и их обработка. В разделе 3 представлены модели и методики определения химического состава цефеиды RS Nor. Раздел 4 посвящен обсуждению полученных результатов.

2. НАБЛЮДАТЕЛЬНЫЕ ДАННЫЕ, ОБРАБОТКА И АНАЛИЗ

2.1. Спектральные наблюдения высокого разрешения

Спектральные наблюдения RS Nor с использованием волоконного эшелле-спектрографа HRS на 11-м телескопе SALT были проведены 27 мая 2016 г. Была сделана одна экспозиция длительностью 650 секунд при качестве изображений примерно $2''/5$.

HRS является термостабилизированным двухлучевым эшелле-спектрографом. Голубое плечо спектрографа охватывает спектральный диапазон 3900–5550 Å, а красное плечо — спектральный диапазон 5550–8900 Å соответственно. Спектрограф оснащен двумя волокнами (волокно объекта и волокно неба) и может использоваться в режимах низкого (LR, $R = 14\,000$ – $15\,000$), среднего (MR, $R = 40\,000$ – $43\,000$) и высокого (HR, $R = 67\,000$ – $74\,000$) разрешения. В наблюдениях по исследованию спектрального состава цефеид был использован режим среднего разрешения (далее — MR) с волокнами диаметром $2''/23$. Оба ПЗС-приемника, как в голубом, так и в красном плечах спектрографа, использовались с бинированием 1×1 пиксел.

Поскольку HRS является термостабильным инструментом, все стандартные калибровки делаются раз в неделю; этого достаточно для достижения спектральной точности 300 мс^{-1} [18]. Стандартная калибровка включает в себя: (1) три спектра плоского поля для нахождения положений спектральных эшелле-порядков и корректировки за эффект спектральной чувствительности вдоль каждого эшелле-порядка (так называемая «поправка за яркость» — «blaze correction») и (2) спектр лампы с полым катодом (Th-Ag) для калибровки длин волн. Кроме того, в начале каждой ночи наблюдений снимаются 11 изображений для последующего учета нулевого уровня (BIAS). Несколько раз в неделю также наблюдаются только те спектральные стандарты скоростей, которые имеют точность определения лучше 20 мс^{-1} . Для обработки используется метод, описанный ниже. Лучевые скорости стандартов измеряются автоматически путем кросс-корреляции с использованием быстрого преобразования Фурье между каждым эшелле-порядком наблюдаемого спектра и модельным спектром звезды, взятым из работы [19]. Полученная медианная оценка скорости и ее ошибка сравниваются с каталожными значениями для получения оценки точности калибровки по длинам волн и изучения стабильности инструмента.

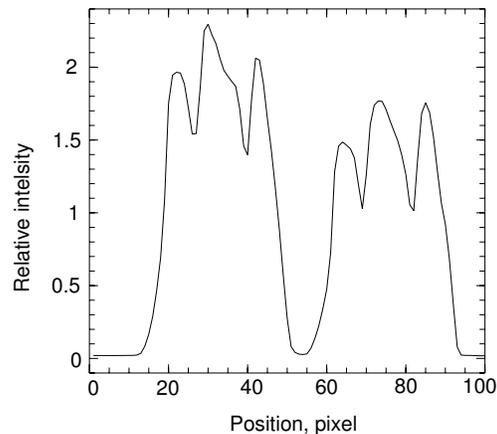


Рис. 1. Типичный поперечный профиль одного эшелле-порядка для спектра лампы плоского поля, полученного на спектрографе HRS в MR-режиме. Левый порядок — от волокна объекта, а правый — от волокна неба. Сложный профиль каждого из них связан с резателем изображения на входной щели спектрографа.

2.2. Обработка спектральных данных

Первичная редукция HRS-данных осуществлялась автоматически с использованием стандартной потоковой обработки, описанной в работе [20]. Дальнейшую обработку данных HRS мы проводили с помощью собственных программ, созданных с привлечением пакетов программ *feros* [21] и *echelle* [22] стандартной системы обработки астрономических данных MIDAS.

Спектроскопическая обработка состояла из следующих шагов:

(1) Используя спектральные плоские поля, мы определяли позиции 36 и 33 эшелле-порядков в данных голубого и красного плеч спектрографа соответственно. Необходимо отметить, что в нашем случае эшелле-порядок состоит по сути из двух порядков: эшелле-порядка объекта и эшелле-порядка неба. Каждый из них в свою очередь имеет сложный профиль, поскольку на входе в спектрограф стоит щель, и оптическое преобразование входного потока из круглого волокна в щель происходит с применением резателя изображения. Типичный профиль одного эшелле-порядка спектрального плоского поля показан на рис. 1. Результат работы программы нахождения центра такого сложного эшелле-порядка показан на рис. 2.

(2) Двумерный фон, обусловленный рассеянным светом, определялся и вычитался из каждого двумерного эшелле-спектра с помощью алгоритма, описанного в работе Шергина, Князева и Липовецкого [23].



Рис. 2. Пример определения центров эшелле-порядков процедурой, настроенной на параметры спектрографа HRS. Приведена небольшая часть двумерного спектра лампы плоского поля. Найденные позиции центров эшелле-порядков показаны квадратиками. Видна сложная структура каждого порядка.

(3) Одномерные эшелле-порядки извлекались для обоих волокон (объекта и неба) однородным образом для всех типов данных: (i) плоские поля, (ii) спектры сравнения и (iii) объекты. При этом использовался алгоритм, позволяющий удалять из извлекаемых порядков следы космических частиц. Рисунок 3 показывает отношение S/N в полученном спектре RS Nor голубого и красного плеча спектрографа. Все представленные на данном рисунке спектральные эшелле-порядки не скорректированы за неравномерное распределение яркости вдоль порядка (blaze-эффект), поскольку после такого исправления спектры будут уже в относительных интенсивностях. Как видно на рисунке, в спектре голубого плеча отношение S/N в центрах извлеченных порядков меняется от примерно 10 на голубом крае до почти 100 на красном, в спектре красного плеча — от 50 до 200 соответственно.

(4) Одномерные эшелле-порядки для обоих волокон были исправлены за неравномерное распределение яркости (blaze-эффект) путем деления на извлеченные порядки плоского поля. Пример

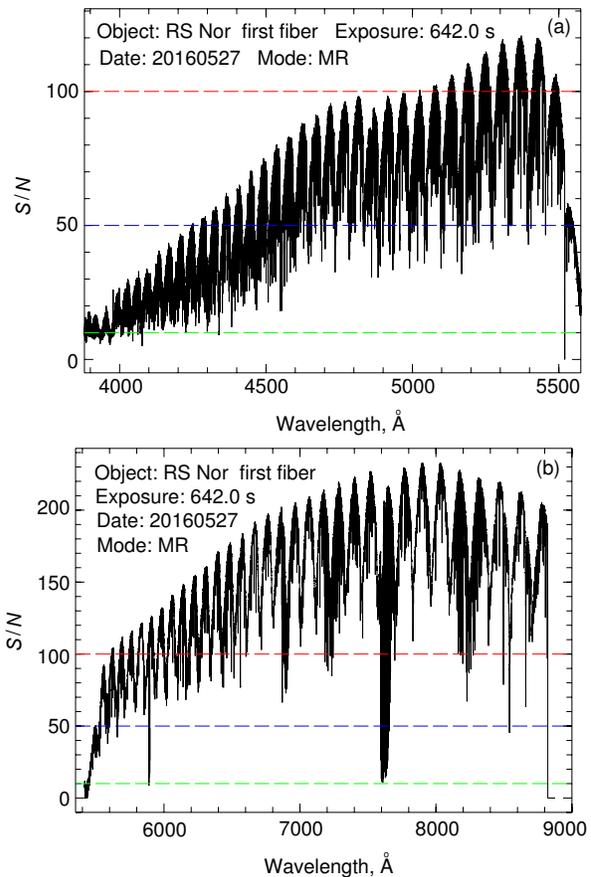


Рис. 3. Отношение S/N в полученном эшелле-спектре цефеиды RS Nor. Горизонтальными линиями выделены уровни $S/N = 10, 50$ и 100 . Показаны все найденные и извлеченные эшелле-порядки, приведенные к длинам волн, но не исправленные за неравномерное распределение яркости (blaze-эффект).

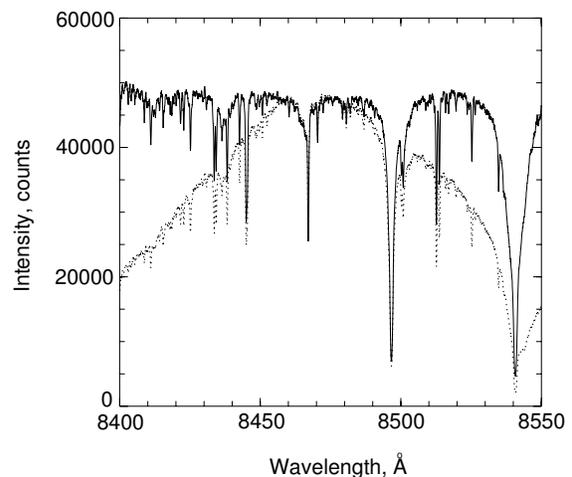


Рис. 4. Пример деления эшелле-порядка на плоское поле для устранения неравномерного распределения яркости (blaze-эффект). Пунктирная линия — эшелле-порядок до процедуры деления, непрерывная линия — после нее.

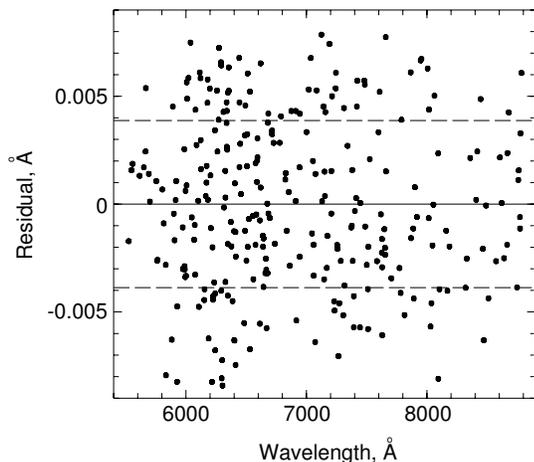


Рис. 5. Распределение разностей между измеренными и вычисленными длинами волн для всех линий спектра сравнения, которые использовались в финальном решении для приведения к длинам волн. Вычисленная дисперсия показана горизонтальными штриховыми линиями. Приведена разность для волокна объекта красного плеча спектрографа.

подобного исправления для одного отдельно взятого порядка показан на рис. 4.

(5) Для построения дисперсионной кривой автоматическая процедура находила порядка 900 эмиссионных линий в извлеченных эшелле-порядках Th-Ag-спектра сравнения голубого плеча спектрографа и около 1000 эмиссионных линий в Th-Ag-спектре сравнения красного плеча. Эти же линии были найдены автоматически на двумерных эшелле-спектрах, и были построены двумерные дисперсионные кривые. Для финальных решений использовалось только около 450 эмиссионных линий в эшелле-порядках голубого плеча спектрографа и примерно 250 эмиссионных линий в эшелле-порядках красного плеча, а остальные по разным критериям были автоматической процедурой отброшены. Точность построения двумерной дисперсионной кривой составила порядка 0.005 \AA для голубого плеча и порядка 0.004 \AA для красного плеча. Процедура построения двумерной дисперсионной кривой была выполнена независимо для волокна объекта и волокна ночного неба. Так как оптические пути волокон слегка отличаются, калибровка длин волн получается слегка разной. Сведения о начальных и конечных длинах волн для каждого спектрального порядка, количестве спектральных линий и финальной точности для каждого эшелле-порядка приведены в таблицах 1 и 2. Итоговое распределение разностей между измеренными и вычисленными длинами волн для эмиссионных линий спектра сравнения показано на рис. 5.

(6) Все извлеченные эшелле-порядки из спектров обоих волокон (объекта и неба) были приведены к равномерной шкале длин волн с одинаковым шагом.

(7) Преобразованный к равномерной шкале длин волн спектр от волокна ночного неба вычитался из спектра объекта с учетом различий в пропускании света обоими волокнами. Функция отношения чувствительности волокон вычислялась с использованием лампы плоского поля.

(8) Все эшелле-порядки были объединены в одномерный спектр. Финальный спектр голубого плеча охватывает спектральную область $3900\text{--}5500 \text{ \AA}$, а спектр красного плеча спектрографа — область $5400\text{--}8900 \text{ \AA}$. Для обоих спектров обратная дисперсия равна примерно 0.042 \AA/пиксел . Небольшой фрагмент голубой области финального спектра RS Nor показан на рис. 6. Спектральное разрешение ($FWHM$), измеренное по всем найденным линиям приведенного к длинам волн спектра сравнения, меняется примерно от 0.10 \AA до 0.15 \AA для голубого спектра и от 0.14 \AA до 0.21 \AA для красного спектра. Изменение полуширины инструментального профиля в зависимости от длины волны показано на рис. 7. Поведение инструментального профиля хорошо приближается полиномом первого порядка и может быть записано в виде:

$$FWHM(\lambda) = 2.2494 \times 10^{-5} \lambda - 1.8954 \times 10^{-2} \quad (1)$$

для синего спектра в области $3900\text{--}5500 \text{ \AA}$ с точностью 0.007 \AA и

$$FWHM(\lambda) = 2.5790 \times 10^{-5} \lambda - 1.0678 \times 10^{-3} \quad (2)$$

для красного спектра в области $5400\text{--}8900 \text{ \AA}$ с точностью 0.005 \AA . Величина разрешения $R = \lambda/\delta\lambda$ в зависимости от длины волны приведена на рис. 8. Как видно на рисунке, полученный диапазон разрешения $R = 36\,500\text{--}39\,000$ слегка отличается от декларируемого разработчиками спектрографа $R = 40\,000\text{--}43\,000$, однако это отличие не превышает 10%.

(9) Была вычислена гелиоцентрическая поправка, которая на сегодняшний день гарантирует точность несколько десятков метров в секунду.

(10) Лучевая скорость была определена путем кросс-корреляции с использованием быстрого преобразования Фурье между наблюдаемым спектром и модельным спектром звезды, взятом из работы [19]. Вычисленная лучевая скорость для наблюдаемого спектра RS Nor равна $-46.60 \pm 0.15 \text{ км с}^{-1}$. Величина полученной ошибки измеряемой скорости хорошо согласуется

Таблица 1. Спектральные порядки для голубого плеча HRS в режиме MR

№	Спектральный порядок	Число линий	Фибер объекта			Число линий	Фибер неба		
			$\lambda_0, \text{Å}$	$\lambda_{\text{end}}, \text{Å}$	RMS, Å		$\lambda_0, \text{Å}$	$\lambda_{\text{end}}, \text{Å}$	RMS, Å
1	119	11	3892.26	3944.07	0.00145	9	3892.64	3943.94	0.00125
2	118	13	3925.51	3977.35	0.00174	10	3925.55	3977.38	0.00164
3	117	13	3959.13	4011.30	0.00126	13	3959.18	4011.32	0.00132
4	116	18	3993.32	4045.83	0.00132	17	3993.36	4045.86	0.00159
5	115	22	4028.10	4080.96	0.00195	23	4028.15	4080.99	0.00174
6	114	21	4063.50	4116.71	0.00147	20	4063.55	4116.74	0.00153
7	113	12	4099.50	4153.12	0.00190	13	4099.57	4153.13	0.00258
8	112	7	4136.20	4190.06	0.00145	5	4137.89	4189.82	0.00231
9	111	18	4173.48	4227.84	0.00205	16	4173.54	4227.87	0.00138
10	110	18	4211.47	4266.25	0.00160	17	4211.52	4266.28	0.00190
11	109	20	4250.15	4305.34	0.00147	21	4250.20	4305.37	0.00196
12	108	23	4289.57	4345.15	0.00170	22	4289.61	4345.18	0.00246
13	107	28	4329.70	4385.73	0.00172	28	4329.75	4385.75	0.00212
14	106	19	4370.60	4427.05	0.00145	19	4370.65	4427.09	0.00168
15	105	25	4412.27	4469.18	0.00179	22	4412.31	4469.21	0.00198
16	104	24	4454.73	4512.11	0.00172	25	4454.78	4512.15	0.00198
17	103	19	4498.01	4555.90	0.00163	20	4498.06	4555.93	0.00157
18	102	22	4542.16	4600.51	0.00221	21	4542.21	4600.54	0.00213
19	101	20	4587.16	4646.03	0.00125	20	4587.22	4646.07	0.00101
20	100	22	4633.07	4692.45	0.00119	24	4633.13	4692.49	0.00184
21	99	23	4679.91	4739.82	0.00164	21	4679.95	4739.86	0.00192
22	98	24	4727.68	4788.15	0.00213	22	4727.74	4788.19	0.00206
23	97	28	4776.45	4837.49	0.00191	27	4776.50	4837.53	0.00205
24	96	23	4826.23	4887.85	0.00129	25	4826.28	4887.89	0.00156
25	95	21	4877.05	4939.27	0.00224	20	4877.10	4939.31	0.00212
26	94	17	4928.95	4991.83	0.00213	17	4929.00	4991.84	0.00219
27	93	15	4981.96	5045.46	0.00171	11	4982.02	5045.50	0.00215
28	92	21	5036.13	5100.27	0.00141	23	5036.18	5100.32	0.00130
29	91	17	5091.48	5156.30	0.00194	13	5091.53	5156.35	0.00228
30	90	20	5148.05	5213.58	0.00198	19	5148.10	5213.63	0.00186
31	89	21	5205.89	5272.15	0.00131	23	5205.95	5272.21	0.00198
32	88	25	5265.04	5332.06	0.00183	25	5265.10	5332.12	0.00212
33	87	18	5325.55	5393.34	0.00143	17	5325.60	5393.39	0.00191
34	86	18	5387.47	5456.05	0.00194	21	5387.52	5456.11	0.00199
35	85	17	5450.82	5520.25	0.00215	18	5450.87	5520.31	0.00259
36	84	0	5515.70	5585.97	—	0	5515.78	5586.03	—

Таблица 2. Спектральные порядки для красного плеча HRS в режиме MR

№	Спектральный порядок	Число линий	Фибер объекта			Число линий	Фибер неба		
			$\lambda_0, \text{Å}$	$\lambda_{\text{end}}, \text{Å}$	RMS, Å		$\lambda_0, \text{Å}$	$\lambda_{\text{end}}, \text{Å}$	RMS, Å
1	85	7	5418.55	5535.59	0.00152	6	5418.30	5535.73	0.00153
2	84	14	5482.69	5601.48	0.00203	13	5482.78	5601.54	0.00246
3	83	12	5548.79	5668.92	0.00314	9	5548.90	5668.97	0.00201
4	82	19	5616.51	5738.01	0.00339	17	5616.60	5738.07	0.00342
5	81	14	5685.88	5808.82	0.00193	15	5685.95	5808.88	0.00333
6	80	11	5756.93	5881.45	0.00155	10	5757.02	5881.52	0.00202
7	79	23	5829.87	5955.81	0.00196	22	5829.96	5955.87	0.00212
8	78	25	5904.61	6032.13	0.00271	24	5904.74	6032.17	0.00320
9	77	29	5981.34	6110.41	0.00293	29	5981.43	6110.47	0.00343
10	76	27	6060.07	6190.77	0.00285	29	6060.15	6190.83	0.00336
11	75	29	6140.87	6273.29	0.00334	26	6140.96	6273.37	0.00304
12	74	28	6223.88	6358.02	0.00301	26	6224.04	6358.06	0.00296
13	73	25	6309.20	6445.05	0.00298	25	6309.29	6445.11	0.00296
14	72	22	6396.80	6534.53	0.00377	21	6396.90	6534.60	0.00305
15	71	16	6486.89	6626.53	0.00299	15	6486.98	6626.59	0.00286
16	70	27	6579.59	6721.15	0.00278	26	6579.68	6721.22	0.00299
17	69	20	6674.93	6818.62	0.00338	15	6675.02	6818.73	0.00330
18	68	18	6773.11	6918.75	0.00309	17	6773.21	6918.82	0.00312
19	67	14	6874.22	7021.95	0.00277	15	6874.32	7022.02	0.00288
20	66	20	6978.38	7128.30	0.00349	22	6978.48	7128.37	0.00322
21	65	23	7085.76	7237.93	0.00285	21	7085.85	7238.00	0.00329
22	64	17	7196.45	7350.99	0.00320	17	7196.54	7351.06	0.00336
23	63	18	7310.69	7467.65	0.00305	18	7310.78	7467.73	0.00247
24	62	12	7428.57	7588.03	0.00207	14	7428.67	7588.10	0.00450
25	61	22	7550.43	7712.36	0.00249	18	7550.47	7712.43	0.00320
26	60	12	7676.16	7840.97	0.00459	8	7676.24	7841.07	0.00410
27	59	11	7806.25	7973.70	0.00385	15	7806.42	7973.78	0.00333
28	58	15	7940.89	8111.16	0.00232	15	7940.99	8111.22	0.00348
29	57	9	8080.10	8253.40	0.00247	9	8080.19	8253.48	0.00225
30	56	8	8224.41	8400.76	0.00337	8	8224.50	8400.85	0.00385
31	55	10	8373.85	8553.51	0.00170	11	8373.94	8553.59	0.00239
32	54	11	8528.93	8711.80	0.00227	12	8529.03	8711.85	0.00355
33	53	11	8689.75	8876.16	0.00157	9	8689.88	8874.71	0.00304

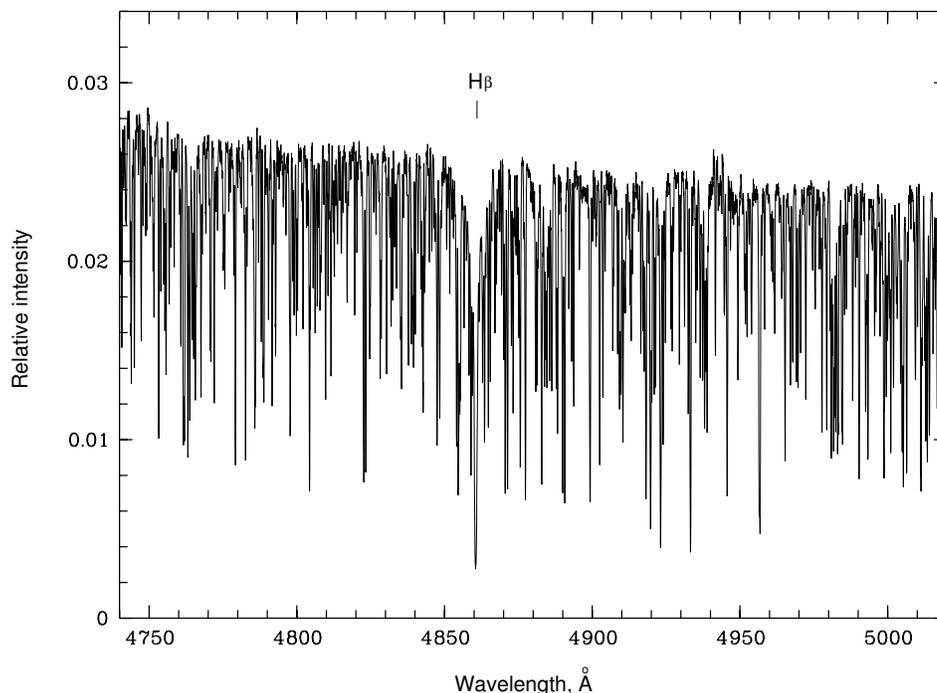


Рис. 6. Небольшой фрагмент финального одномерного спектра голубого плеча спектрографа для RS Nor. Показаны пять спектральных эшелле-порядков в области H β . Границы между порядками практически не видны.

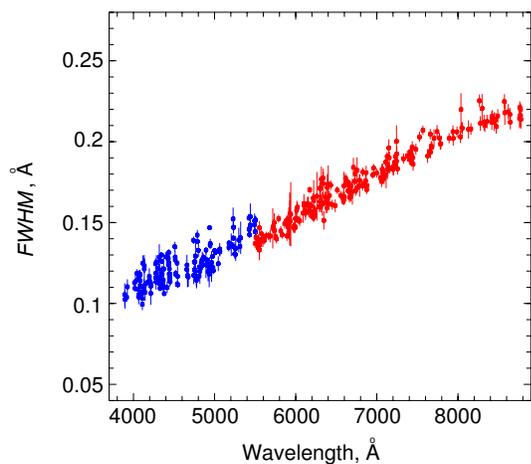


Рис. 7. Зависимость спектрального разрешения ($FWHM$) от длины волны для голубого и красного плеч спектрографа в режиме MR. Рисунок в цвете приведен в электронной версии статьи.

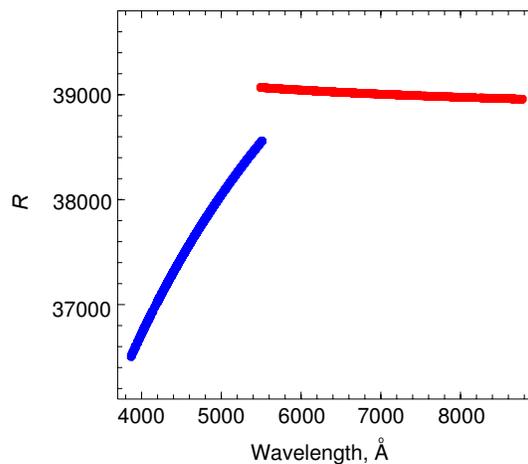


Рис. 8. Величина разрешения $R = \lambda/\delta\lambda$ в зависимости от длины волны для голубого и красного плеч спектрографа в режиме MR. Рисунок в цвете приведен в электронной версии статьи.

с точностью построения дисперсионных кривых, а также с точностью, полученной из систематического сравнения скоростей стандартных звезд для HRS, наблюдавшихся в MR-режиме [18]. Измеренная величина лучевой гелиоцентрической скорости для RS Nor близка к оценке $-40.60 \pm 0.60 \text{ км с}^{-1}$ из работы [24] с учетом того, что наше наблюдение было сделано для фазы $P = 0.28$ [25].

(11) Полученные спектры голубого и красного плеча спектрографа объединяются вместе в единый спектр и исправляются за кривую спектральной чувствительности. Для ее построения раз в две недели наблюдается один из стандартов, спектральное распределение которых известно с шагом 3–4 Å, список которых был специально составлен авторами [26]. Именно на этом шаге при обработке наблюдений RS Nor мы смо-

ли определить для этой звезды избыток цвета $E(B - V) = 0^{m}45 \pm 0.03$, сравнив ее спектр, исправленный за кривую спектральной чувствительности, с модельным из работы [19] для соответствующих температуры и $\lg g$.

Дальнейшая редукция осуществлялась с помощью программного пакета DECH30¹, который предназначен для обработки спектров в формате fits. В пакете реализованы процедуры сглаживания (для уменьшения уровня шума), проведения континуума и дисперсионной кривой для идентификации спектральных линий, а также измерения их эквивалентных ширин (аппроксимацией гауссианой и треугольником, а также прямым интегрированием).

3. ПАРАМЕТРЫ МОДЕЛЕЙ АТМОСФЕР И РАСЧЕТ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА

Для вычисления химического состава звезды необходимо прежде всего определить параметры ее атмосферы:

- (1) эффективную температуру T_{eff} ;
- (2) ускорение силы тяжести на поверхности звезды $\lg g$;
- (3) величину микротурбулентной скорости V_t .

Значения эффективных температур T_{eff} определялись методом спектральных критериев, основанным на использовании отношений глубин избранных пар спектральных линий, наиболее чувствительных к температуре [27]. Для каждой такой пары линий найдены аналитические соотношения между отношением глубин и T_{eff} . Одна пара линий позволяет получить значение T_{eff} с точностью порядка 50–110 К. Поэтому для повышения точности используется как можно большее число таких пар линий (калибровок), результаты по которым усредняются. Именно благодаря большому числу таких калибровок (более 120 в случае желтых сверхгигантов) этот метод обеспечивает *внутреннюю точность* определения значений T_{eff} порядка 10–30 К как ошибки среднего.

Величина ускорения силы тяжести $\lg g$ определяется из условия ионизационного равновесия для атомов Fe I и Fe II. Для $\lg g$ мы приняли погрешность ± 0.1 dex как *формальную неопределенность* на основе численных расчетов, которые показывают, что, начиная с таких вариаций в $\lg g$, возникает различие в ± 0.05 dex между содержаниями железа, полученными по линиям Fe I и Fe II, превышающее ошибки их определения.

Что касается величины микротурбулентной скорости V_t , то она оценивается в зависимости от методов определения химического состава, о которых речь пойдет ниже.

3.1. Модифицированный метод

Химический состав определяется в ЛТР-приближении с использованием программы WIDTH9 и сетки моделей [28]. Метод описан в работе [29] и применяется в качестве альтернативы стандартному методу, при котором (1) значения T_{eff} определяются по отсутствию зависимости между содержанием нейтрального железа Fe I и потенциалом возбуждения нижнего уровня χ_{low} (где ошибки могли превышать 100–150 К), (2) V_t — также по отсутствию зависимости содержаний Fe I, но от эквивалентных ширин линий W_λ , (3) силы осцилляторов берутся из работы [30], (4) химический состав Солнца — из работ [31] и [32]. В модифицированном методе значения T_{eff} находились первоначально по спектрофотометрии или фотометрическим калибровкам с последующим переходом к более точным спектральным критериям, упомянутыми выше. Значения же V_t вычислялись из условия независимости содержания *ионизованного* железа Fe II, определяемого по набору линий, от их эквивалентных ширин. Отказ от использования линий Fe I вызван тем, что они сильно подвержены не-ЛТР-эффектам [33, 34], в то время как линии Fe II практически свободны от этого недостатка [35]. Для V_t отклонения в ± 0.5 км с⁻¹ от принятого значения дают уже заметный наклон в зависимости содержания, определенного по линиям Fe II, от эквивалентной ширины. Поэтому мы принимаем значение ± 0.5 км с⁻¹ в качестве максимально возможной погрешности в микротурбулентных скоростях для модифицированного метода.

Важно отметить, что при определении V_t по линиям Fe II содержание Fe I из-за влияния не-ЛТР-эффектов становится сильно зависимым от эквивалентной ширины W_λ . Чем сильнее линия, тем в среднем больший дефицит она показывает по отношению к слабым линиям. Поэтому содержание Fe I определялось путем линейной интерполяции на линию с $W_\lambda = 0$ [29]. Использование вышеописанной методики позволяет в значительной степени нивелировать не-ЛТР-эффекты для железа.

При расчетах химического состава и параметров атмосфер используются солнечные силы осцилляторов. Химический состав Солнца был рассчитан с этими осцилляторами с помощью сетки моделей [28].

Изменение эквивалентной ширины на 2 mÅ влечет за собой изменение в содержании приблизительно на 0.03–0.06 dex для Fe I, Si I, Ca I и

¹<http://gazinur.com/DECH-software.html>

Ni I. Для содержания C, N и O это изменение равно 0.13–0.23 dex, 0.09–0.13 dex и 0.09–0.21 dex соответственно. Для Na, Mg и Si ошибка равна приблизительно 0.08–0.11 dex, а для Ca I и Ni I — 0.11–0.16 dex. Для тяжелых элементов (Y, Ba, La, Ce, Pr, Nd, Eu) ошибки колеблются в пределах 0.09–0.14 dex. В итоге средняя ошибка определения содержаний с учетом точности нахождения параметров и измерения эквивалентной ширины равна 0.2–0.3 dex. Влияние ошибок вследствие выбора параметров модели и не-ЛТР-эффектов подробно описано в работе [36].

Для анализа использовались линии с эквивалентной шириной, не превышающей 175 mÅ, так как для более сильных линий возможны значительные ошибки из-за неточности значений постоянных затухания. Слишком слабые линии ($W_\lambda < 10 \text{ mÅ}$) измеряются с большой ошибкой, поэтому такие линии для анализа также не использовались.

3.2. Стандартный метод

Отличие используемого нами стандартного метода от его «старой версии» заключается в определении T_{eff} с помощью упомянутых выше спектральных критериев, в остальном же используются модели [37] в ЛТР-приближении, а для нахождения V_t — линии *нейтрального* железа Fe I. Большое число линий Fe I позволяет уменьшить ошибку определения V_t до $\pm 0.3 \text{ km s}^{-1}$. Более корректный учет зависимости величины микротурбуленции от оптической глубины в моделях [37] по сравнению со старыми моделями [28] приводит как к уменьшению получаемых значений V_t , так и к уменьшению разброса оценок микротурбулентной скорости для элементов группы железа с достаточно большим числом линий, особенно для довольно слабых линий. Разница в V_t по линиям Fe I и Fe II для линий слабее 135 mÅ практически отсутствует.

Солнечные содержания для линий элементов получены из «Атласа солнечного спектра» [38], силы осцилляторов взяты из базы данных VALD [39] с использованием солнечной модели [37]. Химический состав Солнца служит стандартом химического состава для изучения всех типов звезд. Сводка наиболее надежных определений содержаний химических элементов в солнечной фотосфере дается в работе [40]. Результат для Солнца находится в некоторой зависимости от взятой модели и используемого списка линий. Полученные нами оценки солнечного химического состава хорошо согласуются с данными Асплунда и др. [40] (см. таблицу 3).

До недавнего времени модифицированный метод широко использовался авторами для определения параметров атмосфер и химического состава

Таблица 3. Сравнение определенного нами химического состава Солнца с данными [40]

Ион	lg A	NL	lg A [40]
O I	8.70	1	8.69 ± 0.05
Na I	6.25 ± 0.04	10	6.24 ± 0.04
Mg I	7.58 ± 0.02	9	7.60 ± 0.04
Al I	6.30 ± 0.01	2	6.45 ± 0.03
Si I	7.55 ± 0.08	23	7.51 ± 0.03
Ca I	6.32 ± 0.07	16	6.34 ± 0.04
Sc I	...		3.15 ± 0.04
Sc II	3.22 ± 0.11	14	...
Ti I	4.96 ± 0.08	41	4.95 ± 0.05
Ti II	5.01 ± 0.03	5	...
V I	4.04 ± 0.12	36	3.93 ± 0.08
Cr I	5.67 ± 0.09	23	5.64 ± 0.04
Fe I	7.57 ± 0.08	164	7.50 ± 0.04
Fe II	7.47 ± 0.04	11	...
Co I	5.00 ± 0.10	28	4.99 ± 0.07
Ni I	6.29 ± 0.06	56	6.22 ± 0.04
Y II	2.15 ± 0.17	7	2.21 ± 0.05
Zr I	...		2.58 ± 0.04
Zr II	2.79 ± 0.19	2	...
La II	1.24 ± 0.02	2	1.10 ± 0.04
Ce II	1.70 ± 0.11	6	1.58 ± 0.04
Nd II	1.54 ± 0.08	11	1.42 ± 0.04
Eu II	0.60	1	0.52 ± 0.04

желтых сверхгигантов Галактики, но с появлением более совершенных сеток моделей морально устарел, что вновь выводит на передний план стандартный метод. Оба метода дают сходные результаты и тестируются нами для случая типичной цефеиды RS Nor. Это сравнение позволяет более эффективно оценить реальную точность определения химического состава для сверхгигантов и корректно сопоставлять результаты больших рядов определений химического состава, которые получены разными группами исследователей.

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Как видно по результатам, представленным в таблице 4, наша оценка T_{eff} на 270 K выше, чем в работе [41]. Спектр в работе [41] был получен на юлианскую дату 2454190.3261, что соответствует значению фазы $P = 0.40$, согласно [25]. Наш

Таблица 4. Параметры атмосферы RS Nor

Параметр	ММ	СМ	Лак [41]
T_{eff} , К	5771 ± 13	5771 ± 13	5499
$\lg g$	2.00	1.60	1.63
V_t , km s ⁻¹	4.00	3.00	3.14
Фаза	0.28	0.28	0.40

ММ — модифицированный метод;

СМ — стандартный метод

спектр, как уже упоминалось выше, получен для $P = 0.28$.

Следует отметить, что наши оценки $\lg g$ и V_t , полученные обновленным стандартным методом, близки к аналогичным оценкам, опубликованным в работе [41], тогда как модифицированный метод дает более высокие значения, особенно для $\lg g$. Лак [41] определял T_{eff} методом из работы [27], а $\lg g$ и V_t — методом, аналогичным обновленному стандартному методу, что скорее всего объясняет имеющиеся различия.

По результатам определения химического состава, приведенным в таблице 5 и на рис. 9, металличность (содержание Fe I) RS Nor, полученная обоими методами (+0.15 dex), весьма характерна для объекта, расположенного «в направлении на центр» Галактики. Оценки металличности в работе [41] превышают наши почти на 0.1 dex. Дефицит углерода для примерно одинаковых оценок характерен для всех методов. По нашим измерениям заметен большой избыток азота, а в работе [41] его содержание не определялось. Есть существенная разница избыточных содержаний кислорода, причем ошибки их оценок — одни из самых больших. Натрий — в избытке, и использованные нами методы дают близкие оценки, но обе они гораздо меньше, чем в работе [41]. Оценки содержания магния совпадают, но ошибки также достаточно велики, а содержание алюминия заметно больше. В работе [41] оценки содержаний этих элементов намного выше. Таким образом, судя по содержаниям ключевых элементов эволюции желтых сверхгигантов, RS Nor уже прошла стадию первого перемешивания.

Что касается содержаний α -элементов, то их оценки примерно одинаковы для двух методов и показывают небольшой избыток, за исключением серы. В работе [41] эти оценки выше. То же самое можно сказать и об элементах Fe-группы. Ошибки невелики для обоих методов. Для некоторых элементов r - и s -процессов наблюдаются заметные различия (цинк, стронций, самарий), но на цинк и

Таблица 5. Сравнение химического состава RS Nor полученного в данной работе, с данными [41]

Элемент	ММ			СМ			Лак [41]
	[E/H]	σ	NL	[E/H]	σ	NL	[E/H]
Li I	-0.22	—	1	-0.15	—	1	
С I	-0.06	0.09	13	-0.11	0.15	16	-0.08
N I	+0.69	0.12	8	+0.60	0.12	9	—
O I	+0.13	0.19	5	+0.32	0.27	11	+0.21
Na I	+0.42	0.04	2	+0.54	0.01	2	+0.77
Mg I	+0.11	0.38	2	+0.11	0.25	2	+0.56
Al I	+0.21	0.07	6	+0.37	0.14	6	+0.49
Si I	+0.20	0.08	16	+0.19	0.12	15	+0.44
Si II	+0.26	0.07	2	+0.30	0.08	2	—
S I	+0.49	0.11	3	+0.32	0.19	2	+0.41
Ca I	-0.00	0.08	6	+0.10	0.07	6	+0.36
Sc II	+0.12	—	1	-0.67	0.15	2	+0.33
Ti I	+0.19	0.12	31	+0.17	0.15	33	+0.27
Ti II	+0.05	0.13	4	+0.09	0.10	3	—
V I	+0.17	0.07	8	+0.12	0.21	8	+0.19
V II	+0.12	0.12	5	+0.21	0.21	5	—
Cr I	+0.17	0.13	18	+0.08	0.11	18	+0.36
Cr II	+0.11	0.09	6	+0.27	0.15	5	—
Mn I	-0.05	0.11	7	+0.18	0.09	8	+0.32
Fe I	+0.15	0.10	199	+0.15	0.12	227	+0.23
Fe II	+0.14	0.04	25	+0.15	0.13	29	—
Co I	-0.04	0.20	8	+0.06	0.19	8	+0.27
Ni I	+0.09	0.14	50	+0.12	0.09	47	+0.23
Cu I	+0.25	0.17	4	+0.20	0.13	6	+0.09
Zn I	+0.09	0.39	3	+0.41	0.19	3	+0.24
Rb I	—	—	—	+0.32	0.10	2	—
Sr I	+0.53	—	1	-0.30	—	1	+0.86
Y II	+0.21	0.12	5	+0.34	0.16	5	+0.35
Zr II	+0.32	0.16	3	+0.18	0.19	2	+0.35
La II	+0.19	—	1	+0.22	0.10	6	+0.31
Ce II	+0.11	0.10	8	+0.13	0.11	9	+0.40
Pr II	+0.04	0.23	3	+0.15	0.37	6	—
Nd II	-0.04	0.12	7	+0.09	0.11	10	+0.14
Sm II	+0.48	—	1	-0.02	0.17	4	+0.04
Eu II	+0.21	—	1	+0.29	0.04	3	+0.28
Gd II	-0.04	—	1	-0.10	—	1	—

ММ — модифицированный метод;

СМ — стандартный метод

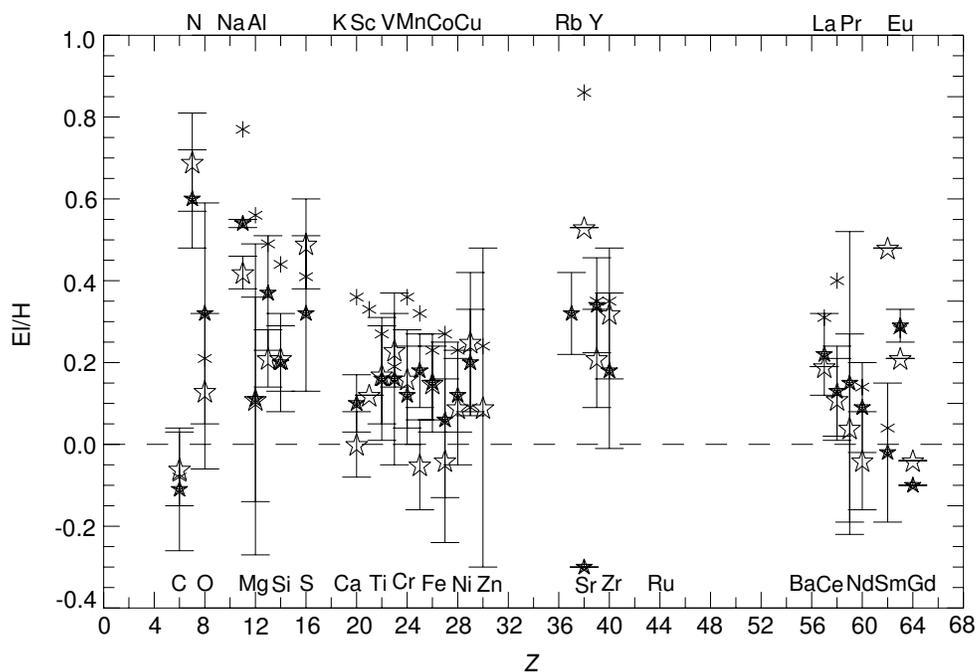


Рис. 9. Сравнения содержаний химических элементов для RS Nor, полученных в этой работе двумя разными способами, и по данным [41]. Светлые пятиконечные звездочки — модифицированный метод, темные пятиконечные — стандартный метод, шестиконечные звездочки — из работы [41].

самарий приходится наибольшие ошибки в определении содержаний. Для сравнения, в работе [41] для подавляющего большинства этих элементов наблюдается гораздо больший избыток.

Разницу между результатами, полученными по нашим данным и опубликованным в работе [41], можно объяснить методикой анализа спектров. В работе [41] эквивалентные ширины линий поглощения определялись автоматической программой, тогда как мы проводим эти операции вручную. Также эта разница легко объясняется различиями в силах осцилляторов, используемых при расчетах содержаний. Однако в целом все методы дают достаточно близкие результаты, совпадающие в пределах ошибок определения.

5. ВЫВОДЫ

В данной статье представлено исследование химического состава цефеиды RS Nor с помощью спектроскопии высокого разрешения на новом эшелле-спектрографе HRS, установленном на телескопе SALT. Суммируя результаты этой работы, можно сделать следующие выводы:

(1) Разработана и протестирована методика обработки эшелле-спектров, полученных на новом двухплечевом двухфиберном эшелле-спектрографе HRS в режиме MR.

(2) Результаты проведенного определения химического состава классической цефеиды RS Nor по наблюдениям на HRS совпадают с оценками других авторов с учетом названных ошибок.

(3) Данные, полученные для цефеид на спектрографе HRS телескопа SALT и обработанные по описанной методике, позволяют изучать содержания химических элементов для этих звезд с точностями не хуже ранее полученных на подобных эшелле-спектрографах.

БЛАГОДАРНОСТИ

Статья подготовлена на основе наблюдений, проведенных на Южном Африканском Большом Телескопе (SALT) по программе 2016-1-MLT-002 (PI: Kniazev).

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено при поддержке Национального исследовательского фонда (National Research Foundation) ЮАР и грантом Российского научного фонда номер 14-50-00043. И.А.У. и В.В.К. выражают признательность Швейцарскому национальному научному фонду SNSF (программа SCOPES, проект IZ73Z0152485) за финансовую поддержку исследований.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. D. A. H. Buckley, G. P. Swart, and J. G. Meiring, SPIE Conf. Proc. **6267**, 62670Z (2006).
2. D. O'Donoghue, D. A. H. Buckley, L. A. Balona, et al., Monthly Notices Royal Astron. Soc. **372**, 151 (2006).
3. E. B. Burgh, K. H. Nordsieck, H. A. Kobulnicky, et al., SPIE Conf. Proc. **4841**, pp. 1463–1471 (2003).
4. H. A. Kobulnicky, K. H. Nordsieck, E. B. Burgh, et al., SPIE Conf. Proc. **4841**, pp. 1634–1644 (2003).
5. S. I. Barnes, P. L. Cottrell, M. D. Albrow, et al., SPIE Conf. Proc. **7014**, 70140K (2008).
6. D. G. Bramall, R. Sharples, L. Tyas, et al., SPIE Conf. Proc. **7735**, 77354F (2010).
7. D. G. Bramall, J. Schmoll, L. M. G. Tyas, et al., SPIE Conf. Proc. **8446**, 84460A (2012).
8. L. A. Crause, R. M. Sharples, D. G. Bramall, et al., SPIE Conf. Proc. **9147**, 91476T (2014).
9. S. M. Andrievsky, R. E. Luck, P. Martin, and J. R. D. Lépine, Astron. and Astrophys. **413**, 159 (2004).
10. V. V. Kovtyukh, S. M. Andrievsky, S. I. Belik, and R. E. Luck, Astron. J. **129**, 433 (2005).
11. R. E. Luck, W. P. Gieren, S. M. Andrievsky, et al., Astron. and Astrophys. **401**, 939 (2003).
12. R. E. Luck, V. V. Kovtyukh, and S. M. Andrievsky, Astron. J. **132**, 902 (2006).
13. R. E. Luck, S. M. Andrievsky, V. V. Kovtyukh, et al., Astron. J. **142**, 51 (2011).
14. I. A. Usenko, A. Y. Kniazev, L. N. Berdnikov, and V. V. Kravtsov, Astronomy Letters **37**, 499 (2011).
15. I. A. Usenko, A. Y. Kniazev, L. N. Berdnikov, et al., Astronomy Letters **39**, 432 (2013).
16. I. A. Usenko, A. Y. Kniazev, L. N. Berdnikov, et al., Astronomy Letters **40**, 435 (2014).
17. I. A. Usenko, A. Y. Kniazev, L. N. Berdnikov, and V. V. Kravtsov, Astronomy Letters **40**, 800 (2014).
18. A. Y. Kniazev, Tech. Rep. № 6, SALT (Southern African Large Telescope, Cape Town, 2016).
19. P. R. T. Coelho, Monthly Notices Royal Astron. Soc. **440**, 1027 (2014).
20. S. M. Crawford, M. Still, P. Schellart, et al., SPIE Conf. Proc. **7737**, 773725 (2010).
21. O. Stahl, A. Kaufer, and S. Tubbesing, ASP Conf. Ser., **188**, 331 (1999).
22. P. Ballester, ESO Conf. Workshop Proc. **41**, 177 (1992).
23. V. S. Shergin, A. Y. Kniazev, and V. A. Lipovetsky, Astronomische Nachrichten **317**, 95 (1996).
24. G. A. Gontcharov, Astronomy Letters **32**, 759 (2006).
25. L. N. Berdnikov, A. Y. Kniazev, R. Sefako, et al., Astronomy Letters **41**, 23 (2015).
26. A. Y. Kniazev, Tech. Rep. № 7, SALT (Southern African Large Telescope, Cape Town, 2016).
27. V. V. Kovtyukh, Monthly Notices Royal Astron. Soc. **378**, 617 (2007).
28. R. L. Kurucz, IAU Symp. **149**, 225 (1992).
29. V. V. Kovtyukh and S. M. Andrievsky, Astron. and Astrophys. **351**, 597 (1999).
30. F. Thevenin, Astron. and Astrophys. Suppl. **77**, 137 (1989).
31. H. Holweger, in *Proc. Int. Conf. on The Elements and their Isotopes in the Universe* (Univ. de Liege, Cointe-Ougree, 1979), pp. 117–138.
32. E. Anders and N. Grevesse, Geohim. Cosmohim. Acta **53**, 197 (1989).
33. L. S. Lyubimkov and A. A. Boyarchuk, Astrophysics **19**, 385 (1983).
34. A. A. Boyarchuk, L. S. Lyubimkov, and N. A. Sakhbullin, Astrophysics **22**, 203 (1985).
35. F. Thévenin and T. P. Idiart, Astrophys. J. **521**, 753 (1999).
36. L. N. Berdnikov, A. Y. Kniazev, I. A. Usenko, et al., Astronomy Letters **36**, 490 (2010).
37. F. Castelli and R. L. Kurucz, arXiv:astro-ph/0405087 (2004).
38. R. L. Kurucz, I. Furenlid, J. Brault, and L. Testerman, *Solar Flux Atlas from 296 to 1300 nm* (Nat. Solar Obs., New Mexico, 1984).
39. F. Kupka, N. Piskunov, T. A. Ryabchikova, et al., Astron. and Astrophys. Suppl. **138**, 119 (1999).
40. M. Asplund, N. Grevesse, A. J. Sauval, and P. Scott, Annual Rev. Astron. Astrophys. **47**, 481 (2009).
41. R. E. Luck, Astron. J. **147**, 137 (2014).

The MAGIC Project. I. High-Resolution Spectroscopy on SALT Telescope and the Cepheid RS Nor as a Test Object

A. Y. Kniazev, I. A. Usenko, V. V. Kovtyukh, and L. N. Berdnikov

We briefly describe the large MAGIC observational project aimed at mass spectroscopic studies of stars of different subsystems of our Galaxy. The project was carried out on the Southern African Large Telescope (hereafter referred to as SALT) with efficient use of its capabilities, astronomical climate, and spectroscopic instruments. We discuss in detail the issues of high-resolution spectroscopy when studying the chemical composition of Galactic Cepheids. Observations of these objects with HRS echelle spectrograph of SALT telescope started in 2016 and currently the number of such observations exceeds one hundred. Spectra were acquired in the medium-resolution mode ($R \sim 36\,500\text{--}39\,000$) with a high signal-to-noise ratio ($S/N \sim 50\text{--}220$). The spectroscopic images acquired were reduced with a package that we developed based on standard MIDAS system. We describe standard reduction steps using the Cepheid RS Nor as a test object. Based on the data of spectroscopic observations we determined the atmospheric parameters and the abundances of 31 chemical elements (36 neutral atoms and ions) whose absorption lines are observed in the spectrum of RS Nor. We performed all computations using two methods and showed that echelle spectra acquired in the medium-resolution mode can be used to study the chemical composition of Cepheids with good accuracy and that the results agree with the results of other studies within the quoted errors.

Keywords: methods: data analysis—stars: variables: Cepheids—stars: atmospheres—stars: abundances—stars: individual: RS Nor