

ПАРАМЕТРЫ ВОЗМОЖНОГО СПУТНИКА НЕЙТРОННОЙ ЗВЕЗДЫ В НАПРАВЛЕНИИ ОСТАТКА СВЕРХНОВОЙ G315.4-2.30

© 2024 г. Ю.В. Пахомов^{1*}¹Институт астрономии РАН, Москва, Россия

Поступила в редакцию 27.09.2024 г.

После доработки 27.09.2024 г.; принята к публикации 27.09.2024 г.

На основе спектров низкого разрешения ($R \approx 3000$) определены параметры звезды Gaia DR3 5877303483506681472 ($G = 19.4$ mag), наиболее близкого объекта к рентгеновскому источнику [GV2003]N в направлении остатка сверхновой G315.4-2.30: эффективная температура $T_{\text{eff}} = 4830$ К, ускорение силы тяжести $\log g = 4.3$, металличность $[\text{Fe}/\text{H}] = -0.05$. Исследована на переменность ее лучевая скорость, в пределах ошибок ($\sigma V_{\text{rad}} \approx 5$ км/с) изменений не обнаружено. Выявлен избыток содержания элементов Ca, Ti, V, Mn. По интенсивности диффузных межзвездных молекулярных полос оценен избыток цвета звезды $E(B - V) = 0.68 \pm 0.08$. Оценка фотометрического расстояния $d = 2.5 \pm 0.9$ кпк указывает на возможную связь с остатком сверхновой.

Ключевые слова: звезды.

DOI: 10.31857/S0320010824090028, EDN: LPEJCE

ВВЕДЕНИЕ

Остаток сверхновой G315.4-2.30 (MSH 14-63, RCW 86) (Роджерс и др., 1960) расположен на расстоянии 2.3 ± 0.2 кпк (Соллерман и др., 2003) в плоскости Галактики ($l = 315.42^\circ$, $b = -02.36^\circ$) и имеет угловые размеры $42'$ в радиодиапазоне (Грин, 2014) и около $4'$ в оптическом, что соответствует линейному размеру 2.7 пк. В остатке обнаружено два рентгеновских источника (Гварамадзе, Вихлинин, 2003; Миньяни и др., 2012) [GV2003]S и [GV2003]N. Первый из них идентифицирован со звездой позднего спектрального класса ($G = 15.4$ mag, $\varpi = 1.71 \pm 0.23$ mas при большой неопределенности параметра астрометрического решения $ruwe = 8.293$), по всей вероятности, с активной хромосферой. На месте второго источника отсутствует видимый в оптическом диапазоне объект. Гварамадзе и др. (2017) провели исследование спектров низкого разрешения ($R \approx 3000$) звезды Gaia DR3 5877303483506681472 ($G = 19.4$ mag), наиболее близкой к рентгеновскому источнику [GV2003]N и расположенной на расстоянии $0.3''$ от него. Они оценили эффективную температуру звезды $T_{\text{eff}} = 5200$ К и содержание нескольких элементов, обнаружили повышенную металличность $[\text{Fe}/\text{H}] = 0.2$ и сильный избыток кальция $[\text{Ca}/\text{H}] \approx 0.81$ в ее атмосфере, а также небольшое изменение лучевой скорости. При этом значение ускорения силы тяжести $\log g = 4.6$ было принято в предположении, что расстояние до звезды равно расстоянию до остатка сверхновой. Избыток

цвета $E(B - V) \approx 0.9$ оценен по фотометрическим наблюдениям в полосах $g'r'i'z'JHK$. Авторы сделали вывод, что рентгеновский источник со светимостью $\sim 10^{32}$ эрг/с не может быть этой звездой и представляет собой нейтронную звезду — невидимый компонент. На тот момент не было данных о расстоянии до системы. Каталог Gaia DR3 (коллаборация Gaia и др., 2023) дает значение параллакса $\varpi = 5.34 \pm 0.88$ mas, что соответствует расстоянию 179_{-22}^{+37} пк, гораздо более близкому, чем остаток сверхновой. С одной стороны, это исключает выводы авторов (Гварамадзе и др., 2017), но, с другой стороны, астрометрическое решение Gaia для этой звезды проблемное, что видно из значений параметров $ruwe = 2.738$ (>1.4), $astrometric_excess_noise_sig = 101.2$ (>2). Более того, при таком расстоянии светимость и радиус звезды должны быть крайне низкими, а ускорение силы тяжести — высоким, что не отражается в ее спектре. В каталоге Gaia DR3 для исследуемой звезды отсутствует информация о цвете $BP - RP$ и избытке цвета.

В 2018 году авторы работы (Гварамадзе и др., 2017) выполнили новые спектральные наблюдения, которые могли бы уточнить параметры звезды и пролить свет на ее природу.

В данной работе на основе спектров 2015 и 2018 годов ставятся задачи уточнения параметров и химического состава звезды Gaia DR3 5877303483506681472, анализа лучевой скорости, определения избытка цвета, оценки расстояния до нее. Для достижения этого необходимо определение параметров звезд и

*Электронный адрес: pakhomov@inasan.ru

межзвездной среды в направлении остатка сверхновой. Статья состоит из описания наблюдений, анализа данных и обсуждения.

НАБЛЮДЕНИЯ И ОБРАБОТКА

Спектральные наблюдения, выполненные на спектрографе FORS2 с длинной щелью ($R \approx 3300$), взяты нами из архива ESO¹: 4 наблюдения в красной части спектра ($\lambda 5870 - 7370 \text{ \AA}$), полученные с 14 апреля по 16 мая 2015 (ProgID 60.A-9203(E) 095.D-0061(A)), использованные авторами (Гварамадзе и др., 2017), и 12 наблюдений в синей части спектра ($\lambda 4625 - 5930 \text{ \AA}$), полученные с 11 февраля по 19 апреля 2018 года (ProgID 0100.D-0060(A)). Отношение сигнала к шуму для разных звезд составило от 10 до 50.

Изображение положения щели спектрографа FORS2 на небесной сфере (рис. 1) получено в режиме прямого изображения в фильтре " $V_{HIGH} + 114$ " (UT 2015-04-14T06:29:55.767) за 30 секунд экспозиции. Фотометрический разрез вдоль щели спектрографа (высота щели около $4'$) во время наблюдений 2015 года показан на рис. 2, на основе которого были выбраны 11 звезд с достаточным отношением сигнала к шуму для дальнейшего анализа. Порядковый номер звезд, их координаты, параллакс ϖ , звездная величина G и параметр *ruwe* астрометрического решения из каталога Gaia DR3, а также отношение сигнала к шуму S/N для суммы всех спектров приведены в табл. 1. Порядковый номер звезд будет нами использован далее в статье. Звезда Gaia DR3 5877303483506681472, наиболее близкая по координатам к рентгеновскому источнику [GV2003]N, получила номер N2.

Архивные спектры были обработаны в комплексе программ MIDAS (The Munich Image Data Analysis System). При предварительной обработке выполнен учет bias, плоского поля и удалены следы космических частиц. По фотометрическому разрезу вдоль щели (рис. 2) были определены положения всех исследуемых звезд на кадре спектра. Спектры каждого объекта были выделены с небольшим участком неба для его учета, и выполнена калибровка по длинам волн с помощью спектра лампы с полым CdHg-катодом, наполненной смесью газов He, Ag и Ne. Для каждой звезды была вычислена ширина профиля изображения звезды вдоль щели и определены границы, в которых суммировался полученный сигнал в спектре. Вне этих границ уровень фона неба был проинтерполирован на положение звезды и вычтен. Таким образом были получены спектры звезд, готовые для анализа.

Уровень непрерывного спектра проводился в несколько этапов, что особенно важно было для синего участка спектра с низким разрешением, где в холодных звездах большое количество атомных и молекулярных линий существенно опускают видимый континуум. На первом этапе проводился

предварительный уровень непрерывного спектра и выполнялась начальная оценка параметров звездной атмосферы (T_{eff} , $\log g$, $[\text{Fe}/\text{H}]$), описанная далее по тексту. Для звезд с $T_{\text{eff}} > 5000 \text{ K}$ блокировка излучения линиями значительно меньше, чем для более холодных звезд, поэтому проведение континуума было наиболее надежным. Спектры этих звезд были использованы для реконструкции функции отклика системы телескоп-спектрограф-ПЗС. Для этого использовались синтетические спектры звезд и предварительная оценка межзвездного поглощения. Усредненная функция отклика позволила преобразовать наблюдаемые спектры из шкалы отчетов ПЗС в шкалу относительных потоков, в которой уровень непрерывного спектра проводился более уверенно.

1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЗВЕЗД

Параметры атмосфер исследуемых звезд: эффективная температура T_{eff} , ускорение силы тяжести $\log g$, металличность $[\text{Fe}/\text{H}]$, скорость микротурбулентции ξ_t , лучевая скорость V_{rad} , — были определены с помощью метода минимизации отклонений между наблюдаемым спектром и синтетическим. Скорость микротурбулентции ξ_t — один из необходимых параметров, поскольку в спектрах низкого разрешения видны лишь насыщенные линии, которые сильно подвержены его влиянию.

Наблюдаемые в разные ночи спектры для каждой звезды были предварительно очищены от выбросов сигнала медианным усреднением, сдвинуты по шкале длин волн с учетом значения проекции скорости Земли на луч зрения и затем сложены для увеличения отношения сигнала к шуму S/N , значения которого приведены в табл. 1. Значения S/N вычислены по уровню накопленного сигнала с учетом коэффициента GAIN ПЗС матрицы. Несмотря на высокие значения, реальное величина S/N , скорее всего, несколько меньше.

Для вычисления синтетических спектров был составлен список спектральных линий. Для этого из базы данных параметров спектральных линий VALD (Рябчикова и др., 2015) с помощью инструмента SELECT STELLAR были выбраны линии с минимальной глубиной 0.01 относительно континуума, которыми можно смоделировать спектры звезд в интервале температур от 3500 K до 8000 K. Малое значение критерия для глубины линии при расчете спектров с небольшим спектральным разрешением выбрано по той причине, что в холодных звездах большую роль играют многочисленные слабые молекулярные линии, которые существенно понижают видимый континуум. Расчет синтетического спектра выполнялся с помощью программы SynthV (Цымбал, 1996; Цымбал и др., 2003) в приближении локального термодинамического равновесия с использованием интерполяции моделей звездных атмосфер MARCS (Густаф-

¹<https://archive.eso.org/>

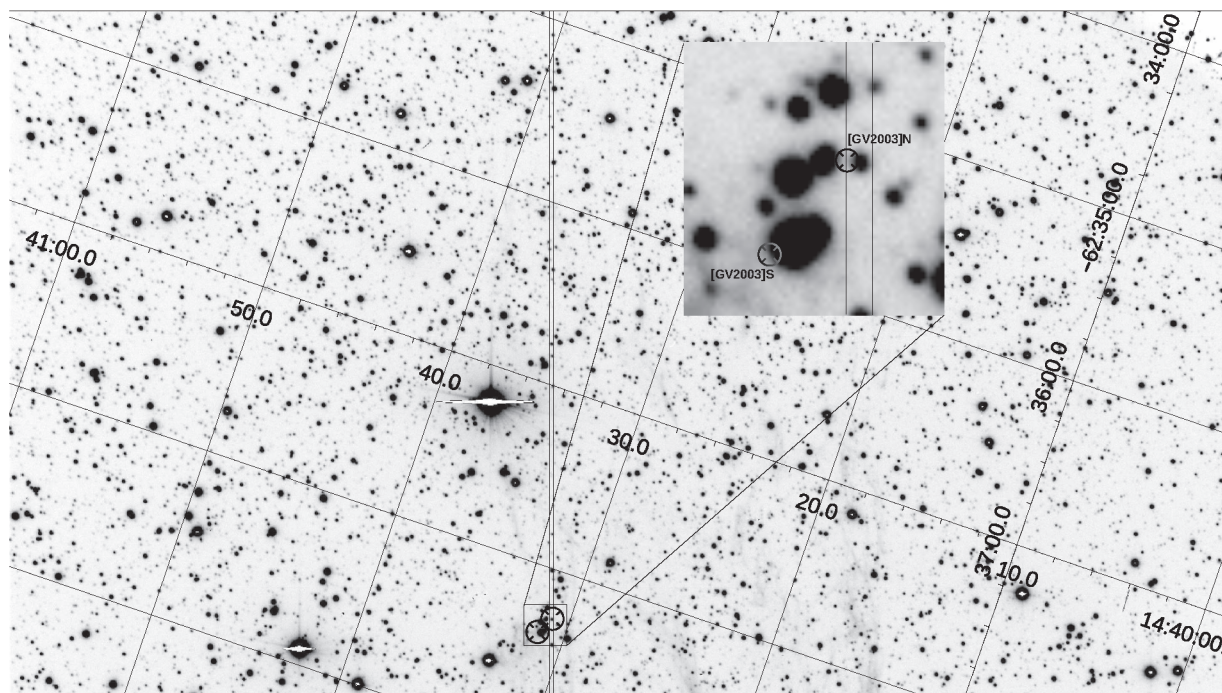


Рис. 1. Положение щели спектрографа на кадре FORS2. Координатная сетка эпохи J2000. Круглыми метками в нижней части щели указаны положения рентгеновских источников [GV2003] N и [GV2003] S, их увеличенная область ($15'' \times 15''$) показана на врезке.

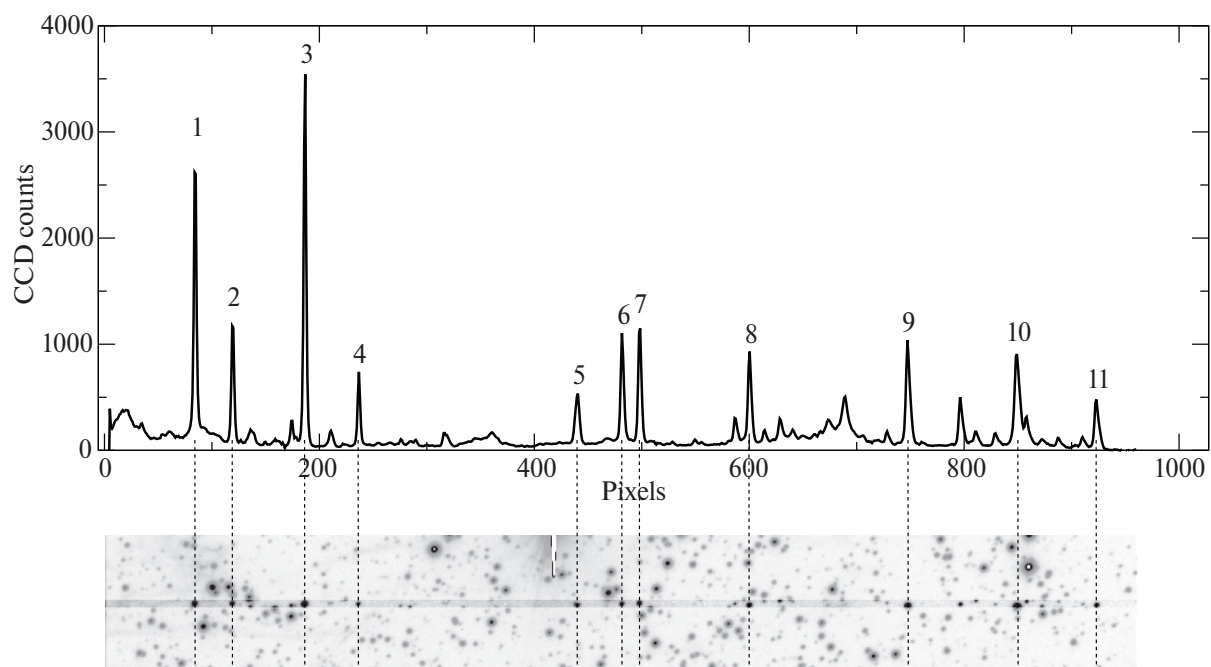


Рис. 2. Фотометрический разрез вдоль щели спектрографа по наблюдениям 2015 г. Цифрами отмечены порядковые номера исследуемых звезд. Внизу показано соответствие положений звезд на щели.

Таблица 1. Список исследуемых звезд

N	Source ID Gaia DR3	RA(2000)	Dec(2000)	ϖ mas	RUWE	G mag	S/N	
							2015	2018
1	5877303376084490496	14:40:30.62	−62:38:25.48	-0.05 ± 0.14	1.009	18.362	158	179
2	5877303483506681472	14:40:31.03	−62:38:17.20	5.34 ± 0.88	2.738	19.431	89	140
3	5877303552226174592	14:40:31.81	−62:38:01.11	0.14 ± 0.13	1.141	18.089	186	254
4	5877303552229489408	14:40:32.41	−62:37:49.18	-0.01 ± 0.36	0.982	19.878	45	93
5	5877303586585994624	14:40:34.78	−62:37:00.53	0.67 ± 0.49	1.212	19.837	53	132
6	5877303586586012672	14:40:35.30	−62:36:50.81	1.29 ± 0.23	1.031	19.132	87	121
7	5877303586586020224	14:40:35.51	−62:36:46.92	-1.17 ± 0.43	1.571	19.372	99	139
8	5877303586586075136	14:40:36.67	−62:36:22.44	0.33 ± 0.20	1.029	18.940	84	179
9	5877304716106151936	14:40:38.38	−62:35:47.31	0.38 ± 0.11	1.020	18.046	109	274
10	5877304720498990848	14:40:39.53	−62:35:23.03	0.18 ± 0.05	0.997	16.608	113	360
11	5877304754817340928	14:40:40.47	−62:35:05.54	0.39 ± 0.24	0.975	19.176	55	147

ссон и др., 2008). После вычисления синтетического спектра проводилась его свертка с инструментальным профилем — гауссианой с переменной шириной, зависящей от длины волны. Спектральное разрешение FORS2 возрастает от $R \approx 2600$ в синей части спектра до $R \approx 3900$ в красной, зависимость $R(\lambda)$ была аппроксимирована по спектру калибровочной лампы. Процедура минимизации реализована на языке Perl Data Language (PDL) с использованием метода Левенберга-Марквардта (Левенберг, 1944; Марквард, 1963). Диапазон используемого спектра составил от 4650 Å до 6700 Å. Более коротковолновая часть в большинстве случаев зашумлена и искажена, а в более длинноволновой части спектра мало звездных линий и много теллурических. Поскольку в исследуемой области неба присутствуют туманности, то небулярные линии были исключены из подгонки наблюдаемого спектра. Кроме того, исключены и части спектра, искаженные теллурическими линиями, линиями межзвездного поглощения (линии Na I D₁, D₂, диффузные межзвездные полосы DIB), космическими частицами и дефектами ПЗС матрицы. Пример маски спектра и конечного синтетического спектра для звезды N1 приведен на рис. 3. Для более быстрой сходимости значение лучевой скорости V_{rad} определялось по сильным линиям, а затем фиксировалось. После определения остальных параметров значение V_{rad} уточнялось.

Полученные параметры для всех звезд приведены в табл. 2. Типичные ошибки определения составили для σT_{eff} около 70–150 K, $\sigma \log g \sim 0.2$ –0.3, $\sigma [\text{Fe}/\text{H}] \sim 0.2$, $\sigma \xi_t \sim 0.3$. Лучевая скорость была определена независимо для каждой из эпох наблюдений. Также в таблице приведены значения $BP - RP$ из каталога Gaia

DR3 и оценки покраснений $E(BP - RP)$, $E(B - V)$, радиусов и масс звезд. Покраснение $E(BP - RP)$ было оценено на основе вычисленного значения нормального цвета $(BP - RP)_0$ по параметрам звезд из соотношений (Мучиарелли и др., 2021). Преобразование $E(BP - RP)$ в $E(B - V)$ выполнено методом Касагранде, ВанденБерг (2018). Массы звезд определялись по эволюционным трекам MESA (Чои и др., 2016) (диаграмма $T_{\text{eff}} - \log g$), рассчитанным для значения $V/V_{\text{crit}} = 0$ с учетом металличности звезды. Радиусы звезд оценены из соотношения $\log g = 4.44 + \log M/M_{\odot} - 2 \log R/R_{\odot}$.

Параметры атмосферы звезды N2 и содержание химических элементов

В отличие от других звезд, для N2 процесс минимизации при определении параметров завершился с большими отклонениями синтетического спектра от наблюдаемого, значительно превышающими шум в спектре. Особенно это проявилось в районе линий триплета магния 5160–5180 Å, где присутствует большое количество молекулярных линий MgH, очень чувствительных к температуре. Также существенное различие показали профили линий Ti, V и Ca. Следовательно, применяемый набор параметров (T_{eff} , $\log g$, ξ_t , $[\text{Fe}/\text{H}]$) не обеспечивает приемлемый результат, что свидетельствует о содержании химических элементов, отличном от солнечного с учетом масштабирования на металличность. Необходимо отдельно определять содержание железа и других элементов, и при определении параметров учитывать не весь диапазон спектра, а только линии железа.

Низкое спектральное разрешение и многочисленность спектральных линий не позволили найти неб-

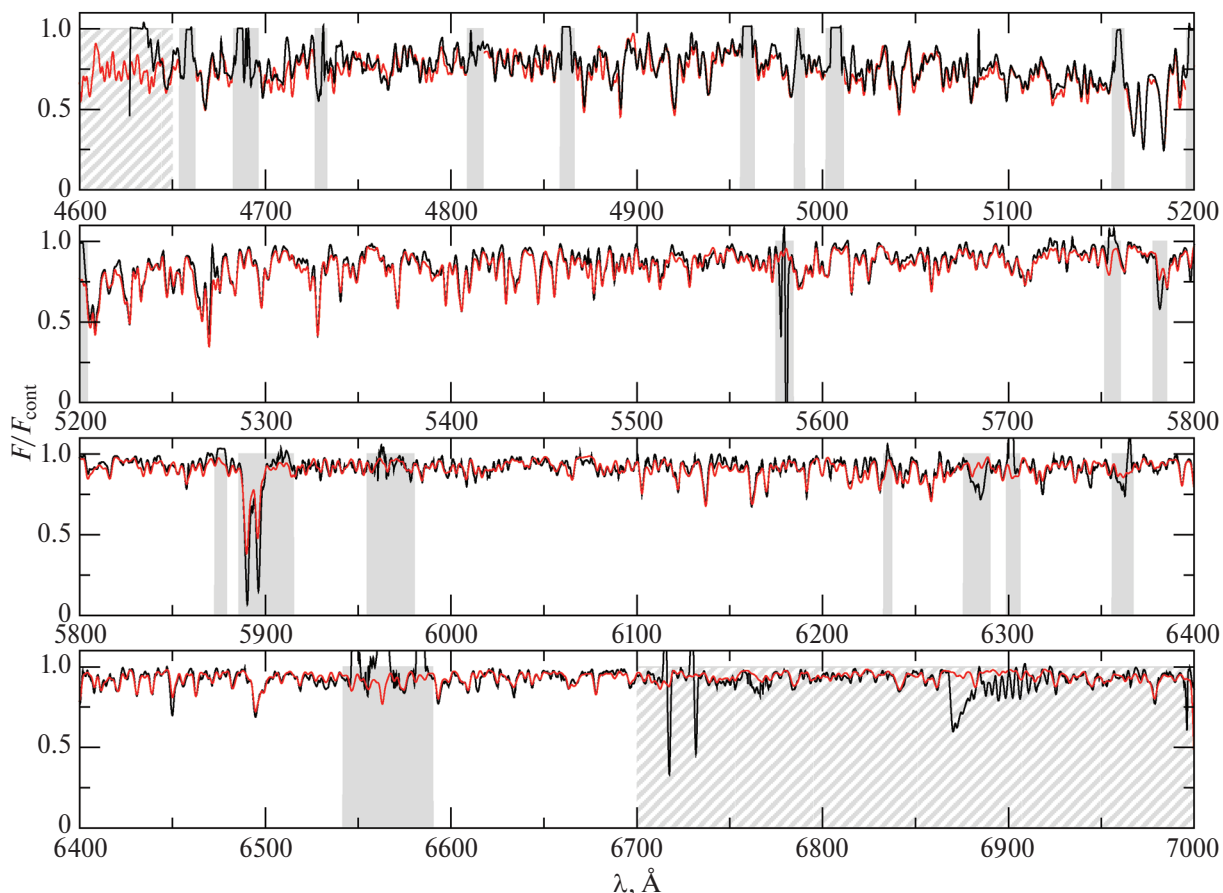


Рис. 3. Наблюдаемый (черная линия) и синтетический (красная линия) спектры звезды N1. Серым цветом отмечены области, исключенные из процедуры минимизации.

Таблица 2. Параметры звезд

N	T_{eff}	$\log g$	[Fe/H]	ξ_t	$V_{\text{rad}}(2015)$	$V_{\text{rad}}(2018)$	$B - R$	$E(B - R)$	$E(B - V)$	$R/R_{\odot}$	$M/M_{\odot}$
1	4550	2.9	0.15	1.5	-66 ± 5	-62 ± 8	2.218	0.884	0.77	5.3 ± 1.7	0.8 ± 0.2
2	4830	4.3	-0.05	1.3	-46 ± 9	-44 ± 7	—	—	0.68	0.9 ± 0.3	0.6 ± 0.1
3	5670	4.0	-0.21	1.3	41 ± 6	39 ± 4	1.681	0.863	0.66	1.5 ± 0.5	0.9 ± 0.2
4	5100	4.5	0.20	1.1	11 ± 11	9 ± 18	1.782	0.722	0.59	0.9 ± 0.3	0.8 ± 0.2
5	5340	4.1	-0.63	1.1	-88 ± 20	-71 ± 15	1.813	0.887	0.70	1.1 ± 0.3	0.6 ± 0.1
6	3800	4.6	-0.80	1.3	-7 ± 9	-10 ± 14	2.200	0.422	0.40	0.5 ± 0.2	0.4 ± 0.1
7	5650	3.5	-0.02	1.3	-92 ± 11	-103 ± 8	2.016	1.184	0.92	3.8 ± 1.2	1.7 ± 0.4
8	5680	4.3	-0.14	1.3	-15 ± 11	-39 ± 4	1.715	0.898	0.69	1.1 ± 0.3	0.9 ± 0.1
9	5960	3.9	-0.27	1.3	8 ± 11	-3 ± 5	1.617	0.893	0.67	1.8 ± 0.5	1.0 ± 0.2
10	4610	2.5	-0.48	1.6	4 ± 17	1 ± 7	2.226	0.944	0.80	6.4 ± 2.7	0.5 ± 0.3
11	4870	4.5	-0.15	1.3	39 ± 10	0 ± 7	1.817	0.668	0.56	0.8 ± 0.2	0.7 ± 0.1

лендированные линии железа. Поэтому были выбраны участки спектра, на которых доминируют линии железа. Для определения этих участков были рассчитаны два спектра: первый $r_1(\lambda)$ — с учетом всех эле-

ментов, второй $r_2(\lambda)$ — с учетом только железа. Отношение $(1 - r_2)/ (1 - r_1)$ показывает относительный вклад железа по всему спектру. Выбраны те участки, для которых это отношение больше 0.75. Полученные

Таблица 3. Содержания химических элементов в атмосфере звезды N2

Ион	N	$\log \epsilon$	$\log \epsilon_{\odot}$	[X/H]
Na 1	1	6.01 ± 0.00	6.27	-0.26
Mg 1	3	7.50 ± 0.10	7.52	-0.02
Ca 1	11	6.50 ± 0.04	6.27	0.23
Ti 1	8	5.28 ± 0.09	4.90	0.38
V 1	6	4.49 ± 0.03	3.95	0.54
Cr 1	3	5.43 ± 0.04	5.63	-0.20
Mn 1	6	5.75 ± 0.10	5.47	0.28
Fe 1	21	7.40 ± 0.11	7.45	-0.05
Ni 1	4	6.25 ± 0.05	6.20	0.05
Ba 2	1	2.32 ± 0.00	2.17	0.15

параметры атмосферы фиксировались, а затем определялись содержания остальных химических элементов на участках с их относительным вкладом больше 0.75 с помощью программы Binmag². Таких элементов нашлось девять.

Подобная процедура была проведена и для участков спектра с относительным вкладом конкретного элемента более 0.50, но большинство из них оказались непригодными для дальнейшего анализа из-за больших ошибок определения содержаний. В этом случае удалось оценить содержание только одного элемента — бария. Его содержание оценено по линии 6141 Å. В спектрах 2018 года есть еще одна линия, 5853 Å с $\log \epsilon = 2.98$, но уровень континуума в этой части спектра проводится неуверенно, и присутствует сильный шум.

Результаты приведены в табл. 3, столбцы которой дают информацию об ионе, количестве N участков спектра, по которым определялось содержание элемента $\log \epsilon = \log(N_{\text{el}}/N_{\text{tot}}) + 12.04$, солнечные значения $\log \epsilon_{\odot}$ из работы (Лоддерс, 2021), и в последнем столбце — их разница [X/H], показанная также на рис. 4. Ошибки содержаний отражают среднеквадратичное отклонение значений содержаний, определенных по разным участкам спектра. Ошибки, вызванные шумом спектра, составляют около 0.2 dex.

Для представления надежности полученных данных внизу на рис. 4 показаны содержания элементов в атмосфере звезды N1, определенные аналогичным методом. Видно, что все элементы имеют содержание, близкое к значению металличности, и отсутствуют какие-либо аномалии. Значит используемый метод определения параметров работает корректно.

Лучевая скорость [GV2003]N

Одной из целей работы является анализ лучевой скорости звезды N2 — возможного компаньона нейтронной звезды. Средние значения V_{rad} двух эпох (-46 ± 9 км/с в 2015 году и -44 ± 7 км/с в 2018 году) не отличаются друг от друга в пределах ошибок. Ошибки измерений V_{rad} соответствуют типичным ошибкам для спектрального разрешения $R = 3000$ и имеющимся значениям отношений сигнала к шуму. Поскольку в течение 2015 и 2018 годов были сделаны серии наблюдений, то для каждого из них были определены лучевые скорости. Так как отдельные спектры имеют низкое значение S/N , то для увеличения точности использовался метод кросс-корреляции отдельных спектров с суммарным. Результат приведен на рис. 5. Как видно из рисунка, в пределах ошибок лучевая скорость звезды N2 постоянна.

2. ФОТОМЕТРИЧЕСКИЕ РАССТОЯНИЯ

Исследуемые звезды очень слабы, и расстояния, вычисленные по параллаксам Gaia DR3, ненадежны из-за их малой величины и большой относительной ошибки. Кроме того, некоторые значения параллакса отрицательные, а для исследуемой звезды N2 параллакс и вовсе отсутствует. Поэтому необходима независимая оценка расстояния, которую можно выполнить фотометрическим методом, используя данные из табл. 2. Для этого по параметрам звездной атмосферы (T_{eff} , $\log g$, [Fe/H]) вычисляем распределение энергии в спектре, используя многомерную интерполяцию по сетке потоков ATLAS9³. Применяем к нему закон покраснения из работы (Матис, 1990) с соответствующим избытком цвета $E(B - V)$, сворачиваем с полосой пропускания фильтра G (Риелло и др., 2021) и, интегрируя, получаем G_{synt} — теоретическую звездную величину 1 см² поверхности звезды. Разница с наблюдаемой величиной

$$G - G_{\text{synt}} = -5 \log \frac{\theta[\mu\text{as}]}{2 \times 2.06265 \times 10^{11}},$$

где θ — угловой диаметр звезды, выраженный в μas , который можно использовать для вычисления расстояния

$$d[\text{кпк}] = \frac{R[R_{\odot}]}{\theta[\mu\text{as}] \times 1.075 \times 10^{-4}}$$

Такая оценка расстояний для далеких звезд более надежна, и ошибки определяются неопределенностью параметров звезды и избытка цвета. Сравнение фотометрических и тригонометрических расстояний приведено в табл. 4 и на рис. 6. Вычисление расстояний на основе параллакса Gaia DR3 проводилось после коррекции параллакса на нуль-пункт, согласно Линдгрен и др. (2021), как максимум функции распределения вероятностей по расстояниям (метод описан в

²<https://www.astro.uu.se/oleg/binmag.html>

³<https://wwwuser.oats.inaf.it/fiorella.castelli/grids.html>

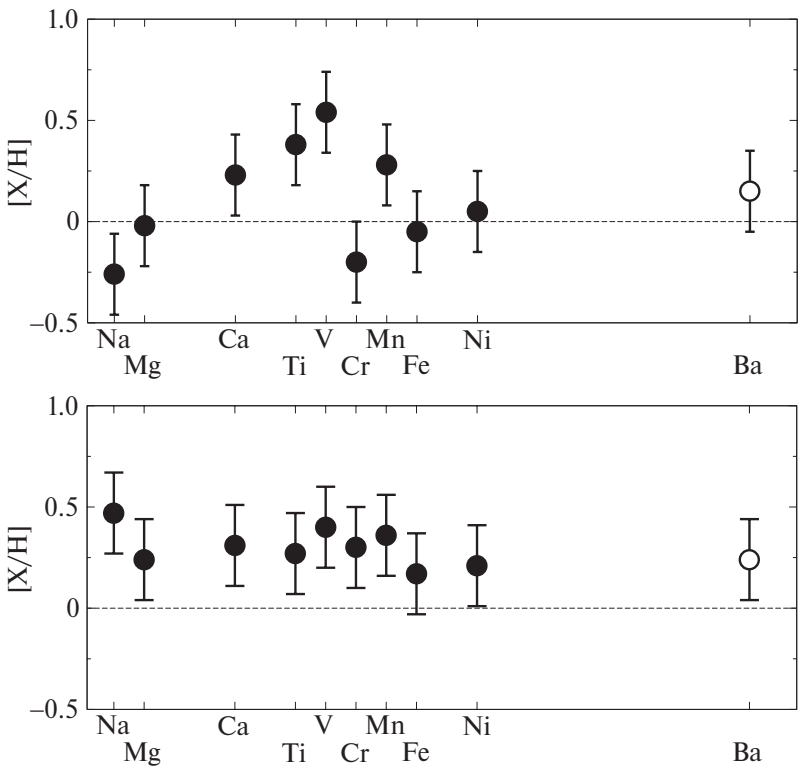


Рис. 4. Содержание химических элементов в атмосфере звезды N2 (вверху) и N1 (внизу). Заполненные кружки — нейтральные атомы, открытые — единожды ионизованные.

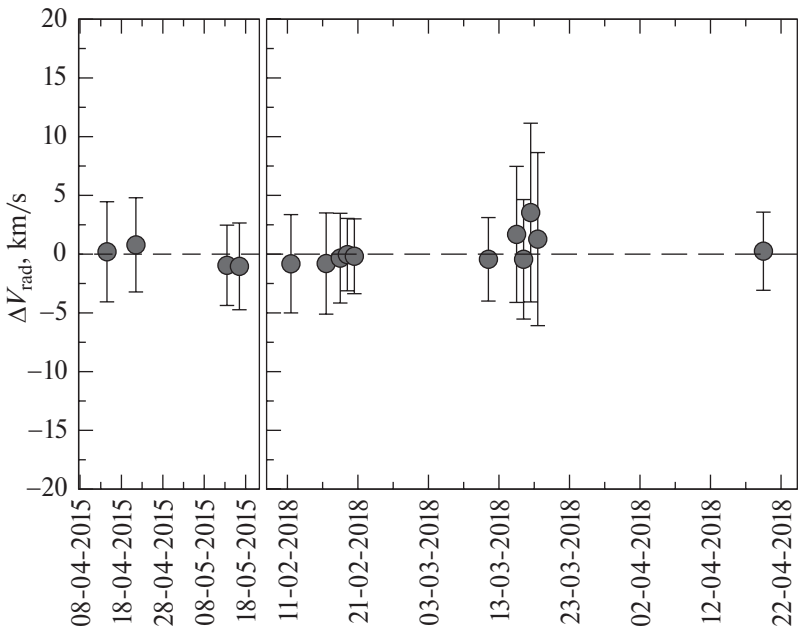


Рис. 5. Изменение лучевой скорости [GV2003]N относительно эпох 2015 и 2018 гг.

Таблица 4. Расстояния до звезд, определенные по параллаксам Gaia DR3 и фотометрическим методом

N	Расстояние, кпк	
	Gaia	Фотометрия
1	—	7.1 ± 2.2
2	$0.18^{+0.04}_{-0.02}$	2.5 ± 0.9
3	$4.5^{+7.4}_{-1.3}$	3.2 ± 1.1
4	—	3.8 ± 1.3
5	$1.0^{+1.2}_{-0.2}$	4.5 ± 1.2
6	$0.8^{+0.2}_{-0.1}$	0.9 ± 0.3
7	—	11.2 ± 3.5
8	$2.2^{+2.5}_{-0.5}$	3.4 ± 0.9
9	$2.5^{+1.2}_{-0.4}$	4.1 ± 1.1
10	$5.9^{+3.6}_{-1.2}$	3.8 ± 1.6
11	$1.8^{+2.1}_{-0.4}$	2.3 ± 0.6

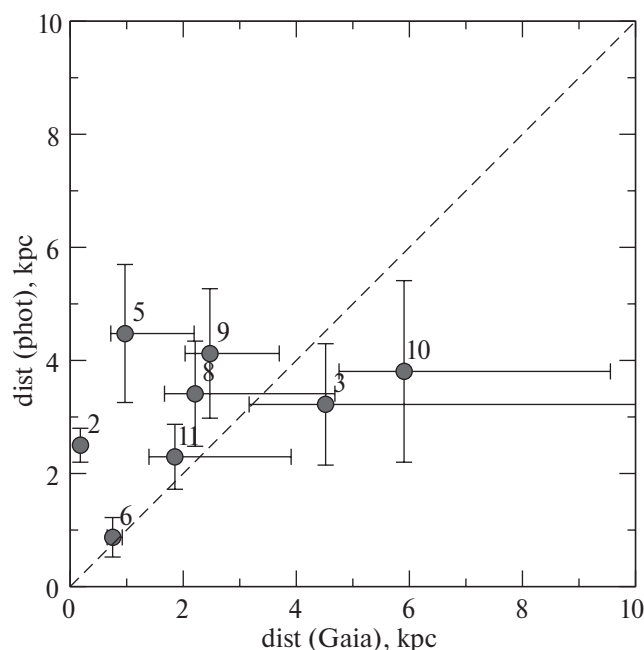


Рис. 6. Сравнение фотометрических и тригонометрических расстояний.

работе (Байлер-Джонс, 2015)). Из рис. 6 видно, что, несмотря на существенные расхождения средних значений, в пределах ошибок значения расстояний для всех звезд, определенные двумя методами, близки, кроме звезд N2 и N5. У звезды N2, как было сказано во Введении, ненадежное астрометрическое решение для параллакса Gaia DR3. Ошибка параллакса звезды N5 сравнима с самой величиной. Две из трех звезд с отрицательными значениями параллакса оказались

самыми далекими по фотометрическим оценкам.

Данный подход применим для всех звезд, кроме исследуемой звезды N2, для которой в каталоге Gaia DR3 нет значения избытка цвета $E(BP - RP)$, и для оценки межзвездного поглощения в этом случае были исследованы интенсивности диффузных межзвездных молекулярных полос (DIB).

2.1. Оценка межзвездного поглощения в направлении звезды N2

В спектрах всех звезд присутствуют диффузные молекулярные полосы, наиболее интенсивные из них — $5780 \text{ \AA}$, $5797 \text{ \AA}$, $6204 \text{ \AA}$, $6284 \text{ \AA}$ и $6614 \text{ \AA}$. Их интенсивность зависит от величины межзвездного покраснения, что дает нам возможность независимой оценки $E(B - V)$ для звезды N2. Для этого из каждого наблюдаемого спектра был выделен спектр межзвездного поглощения путем деления на синтетический спектр звезды. Затем были измерены эквивалентные ширины полос и сопоставлены с величинами покраснения $E(B - V)$, определенными описанным выше методом. Полученные зависимости приведены на рис. 7, которые были использованы для оценки покраснения звезды N2 по измеренным эквивалентным ширинам соответствующих полос. Наиболее четкие зависимости получились для DIB $5780 \text{ \AA}$ и $6614 \text{ \AA}$, хотя в них видны отскакивающие значения для одной-двух звезд. Остальные зависимости выражены не так четко. Большинство DIB блендированы звездными линиями, учет которых может быть не точным, поскольку содержания отдельных химических элементов не определялись. DIB $5797 \text{ \AA}$ и $6204 \text{ \AA}$ довольно слабы и расположены в шумной части спектра. DIB $6284 \text{ \AA}$ состоит из нескольких широких полос и блендирована сильными звездными линиями, что затрудняет измерение интенсивности поглощения. В этом случае мы усреднили значения $E(B - V)$ для звезд N1, N8 и N10, в спектрах которых DIB $6284 \text{ \AA}$ имеет близкое значение интенсивности к измеренному в спектре звезды N2. Все зависимости дают близкие значения покраснения, среднее взвешенное значение $E(B - V) = 0.68 \pm 0.08$, весом служила средняя ошибка аппроксимации зависимостей.

2.2. Оценка расстояния до звезды N2 — компаньона рентгеновского источника [GV2003]N

Зная параметры звездной атмосферы ($T_{\text{eff}} = 4830 \text{ K}$, $\log g = 4.3$, $[\text{Fe}/\text{H}] = -0.05$), покраснение $E(B - V) = 0.68$ и звездную величину $G = 19.43$, можно оценить расстояние до звезды N2 с помощью описанного выше метода. Масса звезды оценена $M = 0.6 \pm 0.1 M_{\odot}$, угловой диаметр $\theta = 3.35 \mu\text{as}$, радиус $R = 0.91 \pm 0.27 R_{\odot}$, расстояние $d = 2.5 \pm 0.9 \text{ кпк}$, которое соответствует расстоянию до остатка сверхновой $2.3 \pm 0.2 \text{ кпк}$.

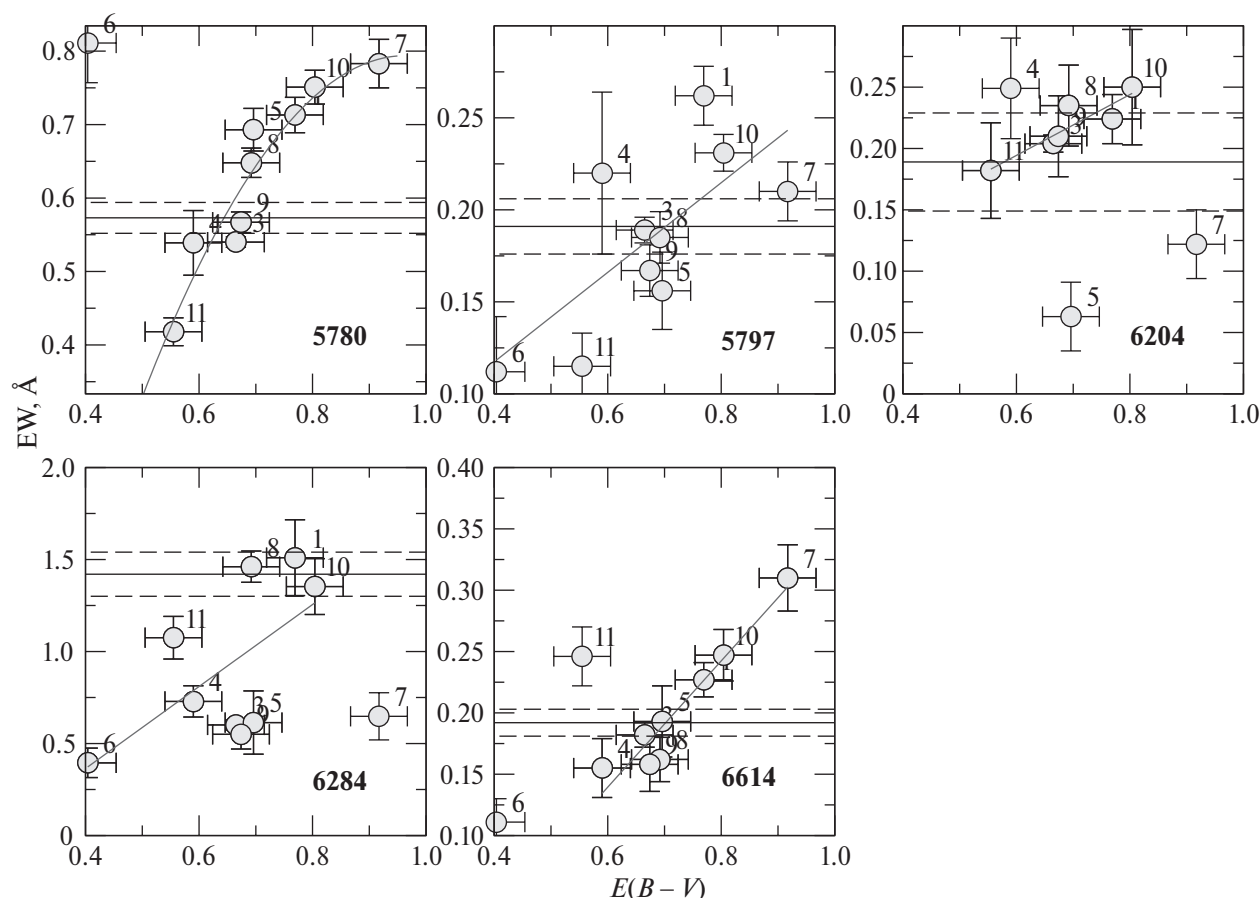


Рис. 7. Зависимости эквивалентной ширины DIB от величины покраснения $E(B - V)$. Сплошной наклонной линией показана аппроксимация зависимостей. Горизонтальные сплошная и прерывистые линии — эквивалентная ширина и ее ошибка соответствующего DIB в спектре звезды N2.

ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные результаты по звезде N2 подтверждают, что она с большой вероятностью находится в районе остатка сверхновой G315.4–2.30. Переменность лучевой скорости не подтверждена в пределах ошибок ее определения. Калибровка по длинам волн выполнена с точностью около 0.01 Å или $\sim 0.5 \text{ км/с}$ по шкале скоростей. Типичная неопределенность значения лучевой скорости звезды составляет $1/10$ – $1/20$ от ширины профиля рассеяния точки, то есть $\sim (0.05\text{--}0.1)c/R$ или около 5 – 10 км/с . В работе Гварамадзе и др. (2017) использовали метод LSD (least-squares deconvolution) для уменьшения ошибки. Однако метод требует наличия набора неблендированных линий, которые отсутствуют в спектре холодной звезды с довольно низким разрешением $R \approx 3000$, при котором ширина профиля элемента разрешения составляет около 100 км/с . Кроме того, отдельные спектры имеют небольшое отношение сигнала к шуму. В данной работе мы применили метод кросс-корреляции для увеличения точности определения лучевой скорости, но не обнаружили ее переменности в пределах 4 – 5 км/с ни в 2015 году, ни в 2018 году, ни между этими двумя эпохами. Если

лучевая скорость звезды изменяется, то ее амплитуда должна быть меньше.

Работа (Гварамадзе и др., 2017) выполнена по спектральному диапазону $\lambda 5870$ – 7370 Å , в котором мало звездных спектральных линий. Анализ синей части спектра позволил значительно уточнить как параметры атмосферы, так и содержания химических элементов. Авторы оценили параметры звезды ($T_{\text{eff}} = 5200 \pm 200 \text{ K}$, $\log g = 4.6 \pm 0.1$) и избыток цвета $E(B - V) \approx 0.9$ по фотометрическим наблюдениям в полосах $g'r'i'z'JHK$. Такой подход дает хорошие результаты лишь при высокой точности фотометрии, лучше 0.01^m , и наличии данных в синих полосах (Пахомов, 2024) в силу высокой корреляции между T_{eff} и $E(B - V)$. В нашей работе мы выполнили независимую оценку покраснения, основанную на интенсивности межзвездных молекулярных полос, которые дали согласованное значение $E(B - V) = 0.68 \pm 0.08$. Точность значения $E(B - V)$ важна для оценки звездных параметров. Меньшее значение покраснения приведет к меньшему значению эффективной температуры, что и получено в нашей работе независимым методом аппроксимации наблюдаемого

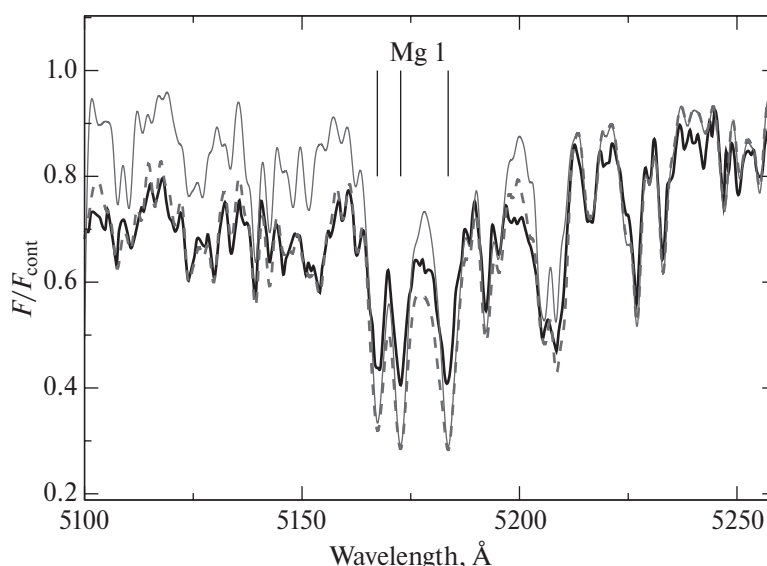


Рис. 8. Участок спектра звезды N2 в районе триплета магния (сплошная линия) по сравнению с синтетическим спектром (пунктирная линия). Тонкой линией показан синтетический спектр без учета молекулярных линий MgH.

спектра синтетическим. Это, в свою очередь, приведет к уменьшению содержаний химических элементов, поскольку почти все линии в спектре принадлежат нейтральным атомам. Поэтому и избыток ряда элементов в нашей работе не столь значительный по сравнению с работой Гварамдзе и др. (2017), где авторы получили высокое значение $[\text{Ca}/\text{H}] = 0.81$ (в настоящей работе нами получено значение $[\text{Ca}/\text{H}] = 0.23$, немного больше солнечного). Сравнить содержание кремния не удалось, так как в спектре отсутствуют участки со вкладом кремния > 0.75 . Есть участок около 51948 Å со вкладом > 0.5 , но он расположен на краю спектра с высоким уровнем шума, что делает его непригодным для определения содержания кремния.

Содержание магния не было определено ранее, так как его наблюдаемые линии присутствуют именно в синей части спектра. Это и триплет магния, и молекулярные полосы MgH, сильно чувствительные к изменению температуры и содержанию магния. Остается необъяснимой низкая интенсивность линий триплета магния по сравнению с синтетическим спектром (рис. 8). При этом находящиеся в том же диапазоне молекулярные линии MgH прекрасно описывают общее понижение континуума и отдельные линии в спектре. Проблема триплета магния, возможно, кроется в локальном фоне неба, яркость которого сравнима с яркостью звезды 19^m . Спектр рассеянного света неба повторяет солнечный спектр со своим триплетом магния, сдвинутым эффектом Доплера относительно звездного на сумму лучевой скорости звезды и скоростей обращения и вращения Земли. В процессе обработки ПЗС кадра фон неба был учтен путем линейной интерполяции между областями под и над звездой. Фон неба обладает собствен-

ным шумом, который может повлиять на процесс обработки. Для уменьшения шума вдоль щели были выбраны участки, свободные от звезд и частей остатка сверхновой, в которых усреднялся спектр фона неба. Вычитание этого спектра фона из спектра звезды не привело к существенным изменениям профилей линий триплета магния. Кроме того, в списке звезд в табл. 1 содержатся еще четыре звезды, сравнимые по яркости или слабее, чем звезда N2. Триплет магния в спектрах этих звезд хорошо описывается синтетическим спектром с полученными параметрами. В архиве EOS/FORS2 есть спектры звезды N2, обработанные с помощью автоматических процедур (pipeline), которые показывают такое же поведение триплета магния. Эти линии были исключены при определении содержания Mg. В спектре звезды N2 есть еще два участка со вкладом магния > 0.75 (линия 5528 Å с содержанием $\log \epsilon = 7.36$ и полосы MgH в районе триплета магния с $\log \epsilon = 7.63$) и один со вкладом > 0.5 — линия 5153 Å с $\log \epsilon = 7.68$. С учетом весов (0.5, 0.3, 0.2) получаем $\log \epsilon = 7.50 \pm 0.10$, значение, близкое к солнечному, то есть избыток магния отсутствует.

Наблюдаются избытки элементов Ti, V, Mn, которые подтверждаются по всем выбранным участкам спектра для каждого элемента. Содержание бария в пределах ошибок нормальное. К сожалению, низкое спектральное разрешение не позволяет оценить содержание остальных элементов, отличных от приведенных в табл. 3, и сделать конкретные выводы о природе этих химических аномалий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе определены параметры звезды Gaia DR3 5877303483506681472, возможно, яв-

ляющей компаньоном рентгеновского источника [GV2003]N, на что указывает полученная в работе оценка расстояния, близкая к расстоянию до остатка сверхновой G315.4-2.30. Обнаружены избытки ряда химических элементов в ее атмосфере. Низкое спектральное разрешение и низкое отношение сигнала к шуму отдельных спектров не позволили выявить переменность лучевой скорости. Для более детального анализа необходимо получить спектр с разрешением не менее 10 000.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Байлер-Джонс (C. Bailer-Jones), *PASP* **127**, 994 (2015).
2. Гварамадзе и др. (V. Gvaramadze, N. Langer, L. Fossati, et al.), *Nature Astron.* **1**, 0116 (2017).
3. Гварамадзе, Вихлинин (V. Gvaramadze and A. Vikhlinin), *Astron. Astrophys.* **401**, 625 (2003).
4. Грин (D. Green), *Bull. Astron. Soc. India* **42**, 47 (2014).
5. Густафссон и др. (B. Gustafsson, B. Edvardsson, K. Eriksson, et al.), *Astron. Astrophys.* **486**, 951 (2008).
6. Касагранде, ВанденБерг (L. Casagrande and Don A. VandenBerg), *MNRAS* **479**, L102 (2018).
7. Левенберг (K. Levenberg), *Quarterly of Applied Mathematics* **2**, 164 (1944).
8. Линдегрэн и др. (L. Lindegren, U. Bastian, M. Biermann, et al.), *Astron. Astrophys.* **649**, A4 (2021).
9. Лоддерс (K. Lodders), *Space Sci. Rev.* **217**, 44 (2021).
10. Марквард (D. Marquardt), *J. Soc. Industrial and Appl. Math.* **11**, 431 (1963).
11. Матис (J. Mathis), *Ann. Rev. of Astron. and Astrophys.* **28**, 37 (1990).
12. Миньяни и др. (R. Mignani, A. Tiengo, and A. de Luca), *MNRAS* **425**, 2309 (2012).
13. Мучиарелли и др. (A. Mucciarelli, M. Bellazzini, and D. Massari), *Astron. Astrophys.* **653**, A90 (2021).
14. Пахомов Ю.В., Письма в Астрон. журн. **50**, 51 (2024) [Y. Pakhomov, *Astron. Lett.* **50**, 34 (2024)].
15. Риелло и др. (M. Riello, F. De Angeli, D.W. Evans, et al.), *Astron. Astrophys.* **649**, A3 (2021).
16. Роджерс и др. (A. Rodgers, C. Campbell, and J. Whiteoak), *MNRAS* **121**, 103 (1960).
17. Рябчикова и др. (T. Ryabchikova, N. Piskunov, R.L. Kurucz, et al.), *Physica Scripta* **90**, 054005 (2015).
18. Соллерман и др. (J. Sollerman, P. Ghavamian, P. Lundqvist, et al.), *Astron. Astrophys.* **407**, 249 (2003).
19. Цымбал (V. Tsymbal), *Astron. Soc. Pacific Conf. Ser.* **108**, 198 (1996).
20. Цымбал и др. (V. Tsymbal, D. Lyashko, and W.W. Weiss), *Modelling of Stellar Atmospheres, IAU Symp. 210* (Ed. N. Piskunov, W. Weiss, D. Gray, Cambridge University Press, 2003), E49.
21. Чои и др. (J. Choi, A. Dotter, C. Conroy, et al.), *Astrophys. J.* **823**, 102 (2016).
22. коллаборация Gaia и др. (Gaia Collaboration and A. Vallenari, A.G.A. Brown, et al.), *Astron. Astrophys.* **674**, A1 (2023).