

He-ЛТР АНАЛИЗ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА А-В ЗВЕЗД ГЛАВНОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ. III. КРИТЕРИИ НОРМАЛЬНОЙ ЗВЕЗДЫ

© 2025 г. А. М. Романовская^{1*}, Т. А. Рябчикова¹, Л. И. Машонкина¹,
Т. М. Ситнова¹, Н. Серебрякова²

¹Институт астрономии РАН, Москва, Россия

²Лёвенский католический университет, Лёвен, Бельгия

Поступила в редакцию 17.01.2025 г.

После доработки 11.02.2025 г.; принята к публикации 04.03.2025 г.

Определены фундаментальные параметры (эффективная температура T_{eff} , поверхностное ускорение силы тяжести и радиус) и химический состав для шести звезд спектральных классов А-В: HD 186689 (ν Aql), HD 58142 (21 Lup), HD 145788, HD 192907 (κ Ser), HD 85504 (7 Sex) и HD 38899 (134 Tau) на основе анализа спектров высокого разрешения и спектрофотометрических наблюдений. Содержание химических элементов определено в приближении локального термодинамического равновесия (ЛТР) для 25 элементов от Li до Nd и для 18 из них — с учетом отклонений от ЛТР (не-ЛТР). У ν Aql, 21 Lup и κ Ser, которые в литературе относятся к нормальным звездам, не-ЛТР содержание элементов от He до Fe, действительно, согласуется с солнечными значениями в пределах 0.1 dex, но наблюдаются избытки Co, Ni, Zn, Sr, Y, Zr, Ba относительно солнечного содержания, и их величина коррелирует с T_{eff} звезды. Таким образом, подтверждена температурная зависимость избытков Zn, Sr, Y, Zr, Ba, обнаруженная в наших предыдущих работах для нормальных звезд, и впервые найдена аналогичная зависимость для Co и Ni. HD 145788 с общим избытком элементов группы железа 0.17 dex находится на начальной стадии превращения в Am-звезду. Профили линий в спектрах 7 Sex и 134 Tau свидетельствуют о том, что это быстровращающиеся звезды, видимые с полюса, и их анализ требует использования методов, учитывающих несферичность звезды.

Ключевые слова: нормальные звезды, спектроскопия, химический состав, спектральное распределение энергии.

DOI: 10.31857/S0320010825010022, EDN: LEOVOV

ВВЕДЕНИЕ

Химические аномалии представляют большой интерес для изучения и понимания физики процессов в звездах. Звезды наследуют химический состав области своего образования, однако в ходе эволюции в атмосферах звезд могут возникать отклонения в содержании химических элементов от первоначального (аномалии). Предполагается, что происхождение аномалий в атмосферах звезд Главной Последовательности (ГП) с малыми скоростями вращения $V < 120 \text{ км с}^{-1}$ (Абт, 2000) связано с процессами атомной диффузии (Мишо, 1970; Ватсон, 1970). В атмосферах звезд происходит дрейф элемента по глубине под совместным действием силы радиационного давления и силы тяжести. Турбулентное перемешивание и потеря массы с постоянной скоростью могут уменьшить аномалии элементов. Существуют А-В звезды с различными типами химических аномалий, такие как магнитные Ap (SiSrCrEu) и немагнитные более горячие (Hg-Mn) звезды, звезды с усиленными линиями металлов (Am) и, наоборот, с ослабленными линиями металлов (ти-

па λ Boo). Нет четкого критерия определения нормальных А-звезд, но считается, что эти звезды показывают близкие к солнечным значениям содержания химических элементов от легких до элементов железного пика в пределах ошибок определения (см., например, Ройер и др., 2014).

В работе Абта (2009) было высказано предположение, что медленно вращающиеся нормальные А-звезды являются молодыми объектами без химических аномалий, которые впоследствии станут звездами Am или Ap. Причем звезды спектральных классов A0-A3 IV и V могут стать Ap(SrCrEu) после некоторого времени на Главной Последовательности, а A4-F1 IV и V в составе двойных систем с орбитальными периодами 2–10 дней — Am-звездами, поскольку скорости вращения уменьшены приливными взаимодействиями.

Для понимания механизмов образования аномалий содержания химических элементов необходимы точные определения содержания элементов от легких до редкоземельных элементов для каждой группы химически-пекулярных звезд. Модели внутреннего строения и эволюции звезд зависят

*Электронный адрес: annarom@inasan.ru

от непрозрачности и требуют точных определений химического состава. Для того чтобы сделать однозначные выводы о различиях в содержаниях между нормальными А-звездами и Солнцем, а также между нормальными и Am-звездами, необходимо рассмотреть формирование спектральных линий. Однако почти все исследования содержаний А-В звезд проводились в рамках предположения о локальном термодинамическом равновесии (ЛТР, LTE — local thermodynamic equilibrium), за исключением отдельных звезд или отдельных химических элементов. Учет отклонений от локального термодинамического равновесия (не-ЛТР, NLTE) является более физически реалистичным подходом при анализе формирования спектров звезд.

В работах Машонкиной и др. (2020) и Романовской и др. (2023) проводилось исследование спектров А-В звезд с узкими линиями для 26 химических элементов, причем для 18 из них — с учетом отклонения от локального термодинамического равновесия. Показано, что у нормальных А-звезд с учетом не-ЛТР эффектов уменьшается разброс в содержаниях химических элементов от He до Ni до ± 0.15 dex относительно солнечного содержания. Также были обнаружены избытки содержания элементов Zn, Sr, Y, Zr, Ba и зависимость этих избытков от эффективной температуры с максимумом в области 10 000 К. Машонкина и Фадеев (2024) показали, что в нормальных звездах содержание Ca и Sc с учетом положительных не-ЛТР поправок может отличаться на ± 0.20 dex от солнечного значения.

Целью работы является расширение выборки нормальных А-В звезд с надежно определенным содержанием химических элементов. Это особенно необходимо для уточнения зависимости содержания тяжелых элементов (Zn, Sr, Y, Zr, Ba) от эффективной температуры у нормальных звезд, поскольку в предыдущих статьях отсутствуют данные в диапазонах 8000–9000 К и 9500–12 000 К.

Статья организована следующим образом. Выбор звезд исследования и источники наблюдений представлены в разделе 1. Определение параметров атмосфер описано в разделе 2. Анализ химического состава и обсуждение полученных результатов представлены в разделе 3. В разделе 4 описано заключение.

1. ЗВЕЗДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И НАБЛЮДЕНИЯ

1.1. Выборка звезд

В новую выборку звезд вошли медленно вращающиеся звезды с узкими линиями с эффективными температурами 8000–10 700 К. Литературные данные о фундаментальных параметрах звезд (эффективная температура T_{eff} , логарифм ускорения силы тяжести $\log g$ и металличность $[\text{Fe}/\text{H}]$) представлены в табл. 1.

HD 186689 (ν Aql) по каталогу Каули и др. (1969) относится к спектральному классу A3IV. Химический

состав был впервые получен в работе Эрспамера и Норта (2003) и указывает на принадлежность к нормальным А-звездам.

HD 58142 (21 Lyn) является звездой спектрального класса A1V по каталогу Каули и др. (1969). В работе Адельмана (1994) было показано, что в атмосфере HD 58142 содержание химических элементов увеличивается с ростом атомного номера, указывающее на принадлежность звезды к спектральному классу Am. Однако Ройер и др. (2014) показали, что звезда относится скорее к нормальным А-звездам, чем к Am.

HD 145788 принадлежит к спектральному классу A1 Si по каталогу Ренсона и Манфруа (2009). Содержание химических элементов для звезды впервые было определено в работе Фоссати и др. (2009). Было показано, что звезда имеет химический состав, похожий на Am-звезды, однако отсутствует дефицит CNO и Sc. Поэтому авторы этой работы предположили, что звезда не относится к Am и могла образоваться в облаке с высокой металличностью. В выборке звезд из работы Ройера и др. (2014) она имеет наименьшую скорость вращения $v_e \sin i$ и относится к нормальным А-звездам.

HD 85504 (7 Sex) имеет спектральный класс A1 Mп по каталогу Ренсона и Манфруа (2009). Адельман и Пинтадо (1997) показали, что звезда имеет повышенное содержание металлов по сравнению с другими нормальными звездами с аналогичной T_{eff} . Ройер и др. (2014) относят ее к нормальным А-звездам.

HD 192907 (κ Ser) является звездой спектрального класса B9 III и является нормальной звездой по каталогу Каули и др. (1969). Химический состав приведен в работе Адельмана и др. (2011), где подтверждается принадлежность к Ser к нормальным А-звездам.

HD 38899 (134 Tau) относится к нормальным звездам позднего спектрального класса B9.5 V по каталогу Каули и др. (1969). Содержание химических элементов приводится в работе Адельмана (1991) и подтверждает принадлежность к нормальным звездам.

1.2. Наблюдения

Спектры высокого разрешения для звезд выборки были взяты из архивов следующих спектрографов: ELODIE¹ и SOPHIE², установленных на 1.93-м телескопе Обсерватории Верхнего Прованса. Наблюдения проводились с 1993 по 2006 г. и с 2006 г. соответственно (разрешающая сила $R = \lambda/\delta\lambda = 42\,000$, в диапазоне 4000–6800 Å; $R = 75\,000$ в режиме HR, 3872–3955 Å); HARPS³ (High Accuracy Radial velocity Planet Searcher), установленном на 3.6-м телескопе обсерватории Ла-Силья в Чили ($R = 115\,000$, 3782–6907 Å); ESPaDOs⁴ (Echelle SpectroPolarimetric

¹<http://atlas.obs-hp.fr/elodie/>

²<http://atlas.obs-hp.fr/sophie/>

³<https://archive.eso.org/scienceportal/home/>

⁴<https://www.cadc-ccda.hia-ihh.nrc-cnrc.gc.ca/en/cfht/>

Таблица 1. Фундаментальные параметры исследуемых звезд из литературы

Звезда	T_{eff}	$\log g$	[Fe/H]	Ссылка
ν Aql	7906	4.21	−0.050	Эрспамер и Норт (2003)
	7700	3.70	−0.300	Гебран и др. (2016)
	8166			Зорес и Ройер (2012)
21 Lyn	9532	3.74		Адельман (1994)
	9520	3.79	−0.004	Ройер и др. (2014)
	10000	3.80	0.000	Гебран и др. (2016)
	9462			Зорес и Ройер (2012)
	9384	3.74		Такеда (2021)
HD 145788	9600			Глаголевский (1994)
	9750	3.70	0.460	Фоссати и др. (2009)
	9594			Зорес и Ройер (2012)
	9410	3.73	−0.137	Ройер и др. (2014)
κ Cep	10350	3.65	−0.050	Смит и Дворецкий (1993)
	10340	3.64	−0.050	Адельман и др. (2002)
	10675	3.65	−0.050	Сенарро и др. (2007)
	10444	3.97	−0.180	Прюньель и др. (2011)
	10929	3.94	0.000	Гарсия Перес и др. (2021)
7 Sex	10110	3.61	−0.020	Адельман и Филип (1992)
	10135	3.69	−0.250	Адельман и Пинтадо (2000)
	10000			Зорес и Ройер (2012)
	10200	3.82	0.033	Ройер и др. (2014)
134 Tau	10825	3.88	0.080	Адельман (1991)
	10850	4.10	−0.050	Смит и Дворецкий (1993)
	10750	4.10	0.000	Адельман и др. (2002)
	10520			Зорес и Ройер (2012)
	11160	4.09		Морел и др. (2022)
	10916	3.88	−0.170	Хурихан и др. (2023)

Device for the Observation of Stars at CFHT), установленном на 3.6-м телескопе обсерватории Мауна-Кеа на Гавайях ($R = 85\,000$, $3670\text{--}10480\text{ \AA}$).

Для 134 Tau использовался спектр, усредненный по 11 наблюдениям в октябре 2023 г., которые были получены одним из соавторов статьи (Н. Серебряковой) со спектрографом HERMES (High-Efficiency and high-Resolution Mercator Echelle Spectrograph, Раскин и др., 2011), установленном на 1.2-м телескопе Меркатор на Канарских островах в Испании ($R = 85\,000$, $3750\text{--}9000\text{ \AA}$). Калибровка длин волн была проведена по эмиссионному спектру торий-аргон-неоновой лампы. Обработка данных наблюдаемых звездных спектров была выполнена с помощью инструментов, описанных в статье Раскина и др. (2011).

Источники наблюдений для каждой звезды со значением отношения сигнала к шуму в области 5550 \AA приведены ниже.

- ν Aql: ELODIE — $S/N = 285$.

- 21 Lyn: ELODIE — $S/N = 395$.
- HD 145788: HARPS — $S/N = 130$.
- 7 Sex: SOPHIE — $S/N = 295$.
- κ Cep: ESPaDOnS — $S/N = 315$.
- 134 Tau: HERMES — $S/N = 600$.

Для построения распределения энергии в спектре были использованы фотометрические наблюдения в различных спектральных диапазонах. Спектрофотометрические наблюдения в УФ-диапазоне $1900\text{--}3000\text{ \AA}$ взяты со спутника TD1 (European Space Research Organisation (ESRO) satellite, Томпсон и др., 1978), который измерял в ультрафиолетовом диапазоне абсолютные потоки в четырех узких полосах с помощью телескопа S2/68. Использованы спектры из архива со спутника IUE (International Ultraviolet Explorer)⁵. В оптическом диапазоне были использова-

⁵<http://archive.stsci.edu/iue/>

Таблица 2. Фундаментальные параметры атмосфер для звезд выборки, полученные методами SED и SME

Звезда	T_{eff} , К	$\log g$	[Fe/H]	ξ_t , км с ⁻¹	ζ_{RT} , км с ⁻¹	$v_e \sin i$, км с ⁻¹	R/R_\odot	L/L_\odot	Параллакс mas	$E(B - V)$	Метод
v Aql	8000 ± 77	4.19 ± 0.17					1.59 ± 0.06	0.97 ± 0.05	18.88*	0.002**	SED
	7960 ± 157	4.34 ± 0.56	-0.16 ± 0.14	3.04 ± 0.58	0.0	33.62 ± 3.79					SME
21 Lyn	9555 ± 27	3.75					3.56 ± 0.09	1.98 ± 0.02	11.90*	0.020	SED
	9650 ± 200	3.75 ± 0.10	-0.04 ± 0.13	2.05 ± 0.55	0.0	18.24 ± 2.35					SME
HD 145788	9720 ± 6	3.70					4.13 ± 0.12	2.14 ± 0.02	6.06*	0.177***	SED
	9800 ± 301	3.73 ± 0.18	0.16 ± 0.19	1.70 ± 0.62	0.0	9.34 ± 1.86					SME
κ Cep	10235 ± 13	3.70					4.35 ± 0.09	2.27 ± 0.02	10.18*	0.007**	SED
	10250 ± 107	3.74 ± 0.04	0.01 ± 0.13	0.60 ± 0.99	0.0	24.15 ± 2.53					SME
7 Sex	10000 ± 11	3.74 ± 0.02					4.28 ± 0.08	2.22 ± 0.01	4.99*	0.014**	SED
	10195 ± 271	3.70 ± 0.13	0.28 ± 0.21	1.08 ± 1.03	0.0	25.25 ± 5.61					SME
134 Tau	10610 ± 10	3.89 ± 0.14					2.90 ± 0.07	1.98 ± 0.02	11.60*	0.001**	SED
	10250 ± 139	3.88 ± 0.05	-0.01 ± 0.18	0.45 ± 1.80	0.0	27.29 ± 4.72					SME

*Gaia Collaboration (2020), **Лаллемент и др. (2014), ***Грин и др. (2018).

ны спектрофотометрические наблюдения из каталога Адельмана и др. (1989), а звездные величины в системе Johnson взяты на сайте Simbad⁶ из каталогов Хог и др. (2000) и Дукати (2002). В ближнем инфракрасном диапазоне данные взяты из каталога 2MASS (2Micron All-Sky Survey, Кутри и др., 2003), который содержит обзор всего неба в фильтрах J (1.25 мкм), H (1.65 мкм) и Ks (2.17 мкм). Наблюдения переведены в абсолютные потоки по калибровкам из работы Коэн и др. (2003).

2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЗВЕЗД

Как видно из литературных данных, приведенных в табл. 1, разброс определений T_{eff} у одной звезды может достигать 660 К. Поэтому для анализа химического состава для каждой звезды из выборки были определены фундаментальные параметры двумя методами, описание которых приводится ниже.

2.1. Спектроскопическое определение с использованием программы SME

Первый метод — определение T_{eff} , $\log g$, металличности ([M/H]), скорости вращения ($v_e \sin i$), микротурбулентной скорости (ξ_t) и макротурбулентной скорости (ζ_{RT}) с помощью пакета программ Spectroscopy Made Easy (SME, Пискунов и Валенти, 2017).

Код рассчитывает синтетические спектры в сетках моделей атмосфер в заданных спектральных областях и выполняет подгонку к наблюдаемым спектрам, находя наилучшее решение для подгоняемых параметров. Мы использовали сетку LLmodels (Шуляк и др., 2004). Для подгонки использовалась оптическая область спектра, включая линии водорода, которые чувствительны к вариациям T_{eff} и, особенно, $\log g$ в интересующем нас диапазоне звездных параметров. Используемые спектральные интервалы содержат ≈300 линий Fe I и Fe II различных энергий возбуждения с эквивалентными ширинами (EW) от 3 до 110 мÅ. Они участвуют в уточнении T_{eff} и $\log g$, так как

учитывается ионизационное равновесие (согласие содержания элемента, определенного по линиям разных стадий ионизации), а также в определении ξ_t . Микротурбулентная скорость определяется путем согласования содержания, полученного по индивидуальным линиям с разной эквивалентной шириной.

Результаты определения параметров атмосфер звезд по анализу наблюдаемых спектров (SME) представлены в табл. 2. Ошибки определения фундаментальных параметров включают ошибки спектральных наблюдений, неопределенности проведения континуума, точность лабораторных измерений атомных параметров спектральных линий, а также ошибки самой процедуры подгонки свободных параметров (ковариационная матрица), которые составляют не более 5 К для T_{eff} и 0.01 для $\log g$, [Fe/H], ξ_t и $v_e \sin i$.

2.2. Фотометрические параметры по спектральному распределению энергии

Второй метод — подгонка теоретического спектрального распределения энергии (SED — Spectral Energy Distribution) к наблюдениям путем варьирования параметров атмосферы из сетки моделей LLmodels, где поглощение в каждой линии рассчитывается с учетом индивидуального химического состава.

При подгонке одновременно могут варьироваться T_{eff} , $\log g$, [Fe/H] и радиус звезды (R/R_\odot). Однако для предположительно Am-звезды HD 145788 использовался фиксированный химический состав, полученный по методу SME, а для нормальных A-звезд фиксировалось солнечное содержание химических элементов. Также при расчете потоков мы учитываем межзвездное поглощение, поскольку звезды расположены на разных расстояниях (см. табл. 2.). Поправка на межзвездное покраснение применялась согласно кривой экстинкции из работы Фитцпатрика (1999) с $A_V = 3.1 \times E(B - V)$. Значения $E(B - V)$ были взяты из карты распределения пыли (Лаллемент и др., 2014): 0.002 ± 0.016 (v Aql), 0.002 ± 0.015 (21 Lyn), 0.151 ± 0.023

⁶<https://simbad.cds.unistra.fr/simbad/>

(HD 145788), 0.007 ± 0.015 (к Сер), 0.014 ± 0.017 (7 Sex) и 0.001 ± 0.015 (134 Tau).

v Aql. Для расчета SED использовались фотометрические данные из каталогов TD1, Johnson, 2MASS. Варьировались радиус, T_{eff} и $\log g$. В результате мы получили значения, близкие к параметрам, полученным по SME. Для дальнейших расчетов использовали модель из SME. Спектральное распределение энергии для звезды представлено на рис. 6.

21 Lyn. Для расчета использовались данные наблюдений из каталогов Адельмана, TD1 и 2MASS. Логарифм ускорения свободного падения $\log g$ был взят из решения SME и зафиксирован на 3.75. Эффективная температура T_{eff} для 21 Lyn оказалась отличной от SME на 220 K, что несколько больше ошибки определения температуры по SME ± 200 K. Увеличение $E(B - V)$ в пределах ошибок определения позволяет согласовать фотометрическую температуру с той, что получена по SME, в пределах 100 K. На рис. 1а представлены SED для решения SME и SED с увеличенным поглощением.

HD 145788. В оптической области были доступны только фотометрические данные Tycho-2, а в УФ- и ИК-областях также использовались данные из каталогов TD1, IUE и 2MASS. Из архива IUE доступны только наблюдения с инструментом SWP (1150–1980 Å). Аналогично 21 Lyn, мы зафиксировали $\log g$ на значении 3.70. $T_{\text{eff}}^{\text{SED}}$ с поглощением из карты пыли по Лаллемент (2014) получилась равной 9430 K, что на 370 K меньше, чем $T_{\text{eff}}^{\text{SME}}$ (табл. 2). Однако звезда является одной из самых удаленных из звезд нашей выборки (165 пк), и есть вероятность, что значение $E(B - V)$ по Лаллемент (2014) недооценено. По карте пыли из работы Грин и др. (2018) мы получили $E(B - V) = 0.177$, что согласуется с увеличенным в пределах ошибки значением из Лаллемент (2014). Расчеты SED с этим значением покраснения и с зафиксированным по решению SME $\log g = 3.70$ показали хорошее согласие по T_{eff} , полученными двумя методами. На рис. 1б приведены расчеты по двум моделям: SME с параметрами модели атмосферы 9800g3.73 и SED с параметрами 9720g3.70.

к Сер. Использовались данные из каталогов: IUE, TD1, Адельмана и 2MASS. При расчете величина $\log g$ была получена из SME и зафиксирована на значении 3.70. В результате была получена модель атмосферы с параметрами 10235g3.70, что очень хорошо согласуется с решением SME: 10250g3.74. Анализ химического состава был проведен с моделью 10250g3.74. Спектральное распределение энергии для звезды представлено на рис. 7.

Для проверки адекватности выбранной модели атмосферы по решению SME для звезд 21 Lyn и HD 145788, мы построили графики зависимости содержания по отдельным линиям Fe I – II от приведенной эквивалентной ширины и от потенциала возбуждения (рис. 2). В первом случае отсутствие зависимо-

сти подтверждает правильность полученной микротурбулентной скорости ξ_t , а во втором – параметров атмосферы T_{eff} и $\log g$.

7 Sex. Для звезды доступны наблюдения IUE и TD1 в УФ-области, в оптической области – Johnson, и в ИК-области – 2MASS. Несмотря на ограниченное количество данных в оптической области, значения параметров моделей по SED и SME получились близкими в пределах ошибок определений с разницей в $T_{\text{eff}} = 195$ K: 10000g3.74 и 10195g3.70 соответственно. Спектральное распределение энергии для звезды с двумя моделями атмосфер представлено на рис. 8.

134 Tau. Для звезды есть наблюдения из тех же каталогов, что и для к Сер. Полученная $T_{\text{eff}}^{\text{SED}} = 10610$ K на 360 K больше, чем $T_{\text{eff}}^{\text{SME}}$, при этом $\log g$, полученные по двум методам, сходятся с разницей 0.01 dex. Спектральное распределение энергии для звезды с двумя моделями атмосфер представлено на рис. 9.

В звездах 7 Sex и 134 Tau форма профилей спектральных линий аналогична наблюдаемым у известной А-звезды Веги, которая является быстровращающейся звездой, наблюдаемой с полюса вращения (Хилл и др., 2010). Сравнение профилей линий в спектрах 134 Tau, 7 Sex и Веги показано на рис. 3. Мы делаем вывод, что 7 Sex и 134 Tau также являются звездами с большой скоростью осевого вращения, наблюдаемыми с полюса. Быстрое вращение изменяет форму звезды от сферически-симметричной к эллипсоидальной, что приводит к неоднородному распределению температуры по поверхности. В таких случаях определение параметров атмосферы и анализ химического состава требуют учета несферичности и неоднородного распределения $T_{\text{eff}}/\log g$ по поверхности звезды, что планируется провести в ближайшее время. В рамках нашего исследования параметры атмосферы и содержание химических элементов в звездах определялось в приближении сферически-симметричной звезды. Различие в T_{eff} между разными методами определения для 134 Tau, вероятно, связано с неоднородностью распределения T_{eff} по поверхности звезды.

Результаты определения параметров атмосфер по SED с подобранным поглощением $E(B - V)$ представлены в табл. 2. Для анализа химического состава для звезд выборки в дальнейшем мы использовали модели с параметрами атмосфер, полученными по спектроскопии (SME).

3. СОДЕРЖАНИЕ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

3.1. Методы определения

Определение содержания химических элементов проводилось методом подгонки синтетического профиля спектральной линии к наблюдаемому по программе BinMag6 (Кочухов, 2018), позволяющей варьировать содержание элемента, макротурбулентную скорость, проекцию скорости вращения

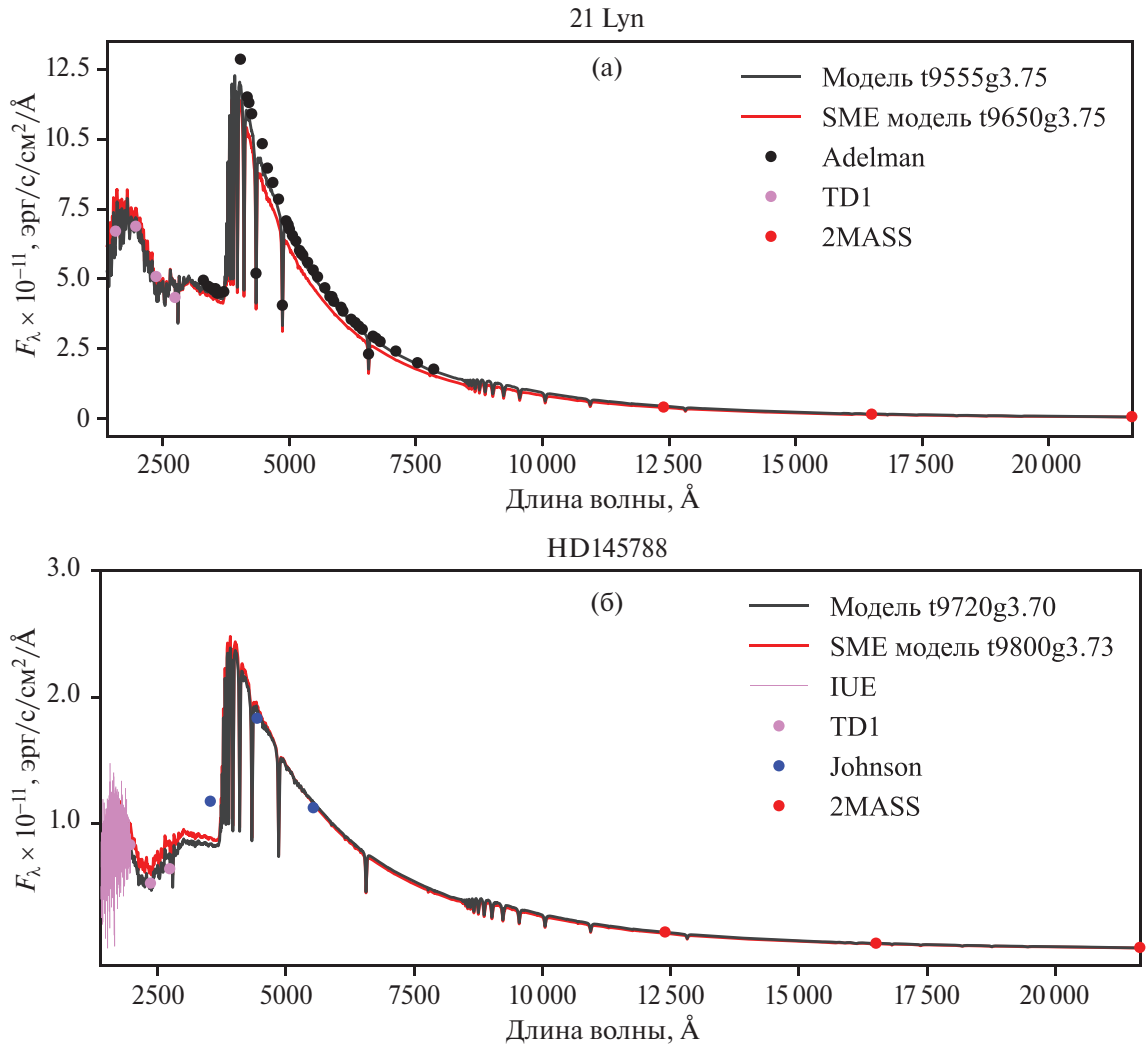


Рис. 1. Спектральные распределения энергии для 21 Lyn (а) и HD 145788 (б). Черной линией показано распределение энергии, полученное в результате расчетов с подобранным значением $E(B - V) = 0.177$ и 0.02 соответственно; красной линией представлено спектральное распределение энергии по решению SME.

на луч зрения $v_e \sin i$ и лучевую скорость звезды V_r . Для элементов до Ba содержания химических элементов получены по линиям нейтральных атомов и первых ионов, а для редкоземельных элементов — по линиям первых и вторых ионов. Синтетические спектры рассчитывались с помощью кода SynthVb (Цымбал и др., 2019), который позволяет получать не только ЛТР, но и не-ЛТР профили исследуемых спектральных линий путем использования b-факторов (отношение заселенности уровней атомов в не-ЛТР к ЛТР), рассчитанных по программе DETAIL (Батлер и Гиддингс, 1985; Пшибылла и др. 2011).

Содержание элементов приведено в стандартной шкале, $\log \epsilon = \log(N_{\text{El}}/N_{\text{H}}) + 12$, где N_{El} и N_{H} — концентрации атомов данного химического элемента и водорода соответственно. Для каждой звезды полный список линий с атомными параметрами и индивидуальными содержаниями доступен онлайн.

Пример организации списка линий приведен в табл. 3.

3.2. Учет не-ЛТР эффектов

Для большей части химических элементов содержание определено как в рамках ЛТР, так и при отказе от предположения ЛТР. Не-ЛТР расчеты для C I-II, N I, O I, Ne I, Na I, Mg I-II, Si I-II, Ca I-II, Sc II, Ti II, Fe I-II, Zn I, Sr II, Y II, Zr II и Ba II выполнены с использованием модифицированной версии кода DETAIL и моделей атомов, разработанных ранее в нашей группе (см. ссылки в статьях Машонкиной и др. (2020) и Романовской и др. (2023), а также работы Машонкиной, 2024; Машонкиной и Рябчиковой, 2024). Отметим, что модель атома Ti I-II усовершенствована путем включения современных данных о возбуждении уровней Ti II электронным ударом из квантово-механических расчетов Таяла и Зацаринного (2020). Эта модификация не привела к существен-

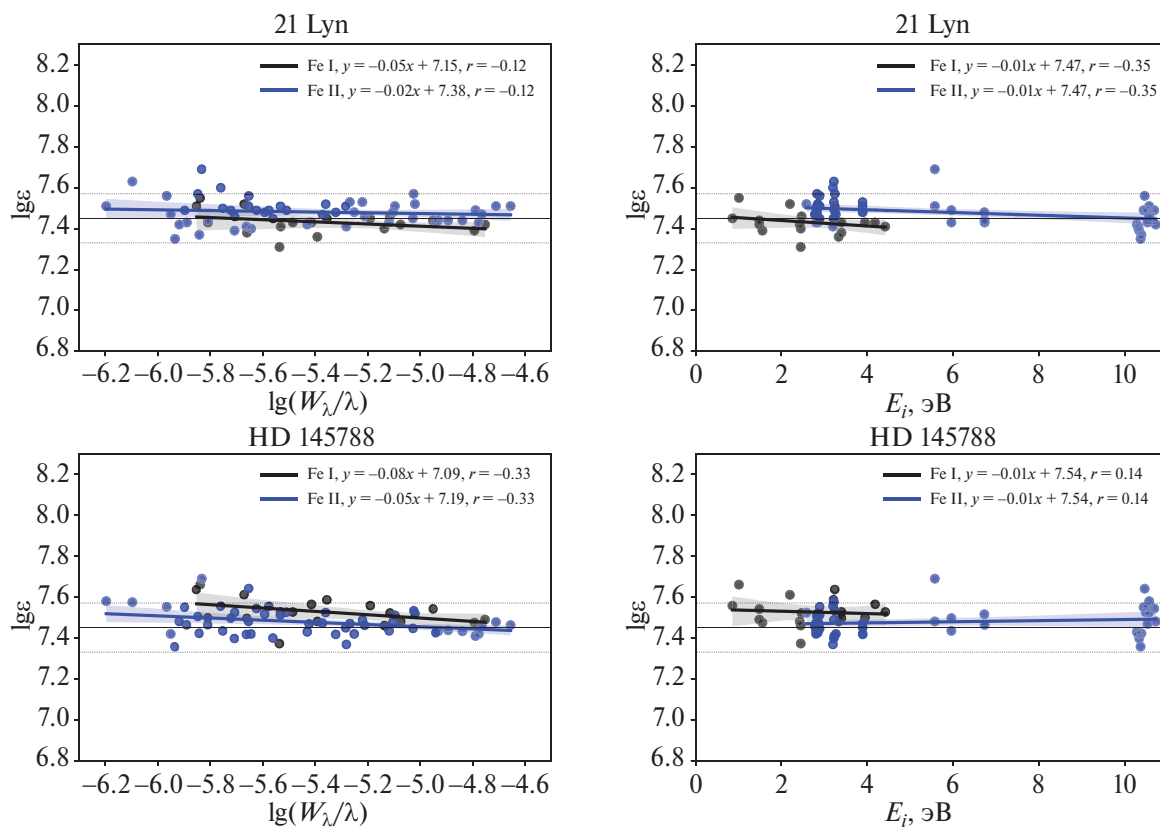


Рис. 2. Содержание Fe I (черные точки) и Fe II (синие точки) по отношению к приведенным эквивалентным ширинам $\log(W_\lambda/\lambda)$ и потенциалу ионизации E_i для звезд 21 Lyn и HD 145788. Содержание Fe на Солнце представлено сплошной горизонтальной линией. Штриховыми линиями указаны различия на ± 0.12 от солнечного содержания. Величина r на графиках – коэффициент корреляции Пирсона.

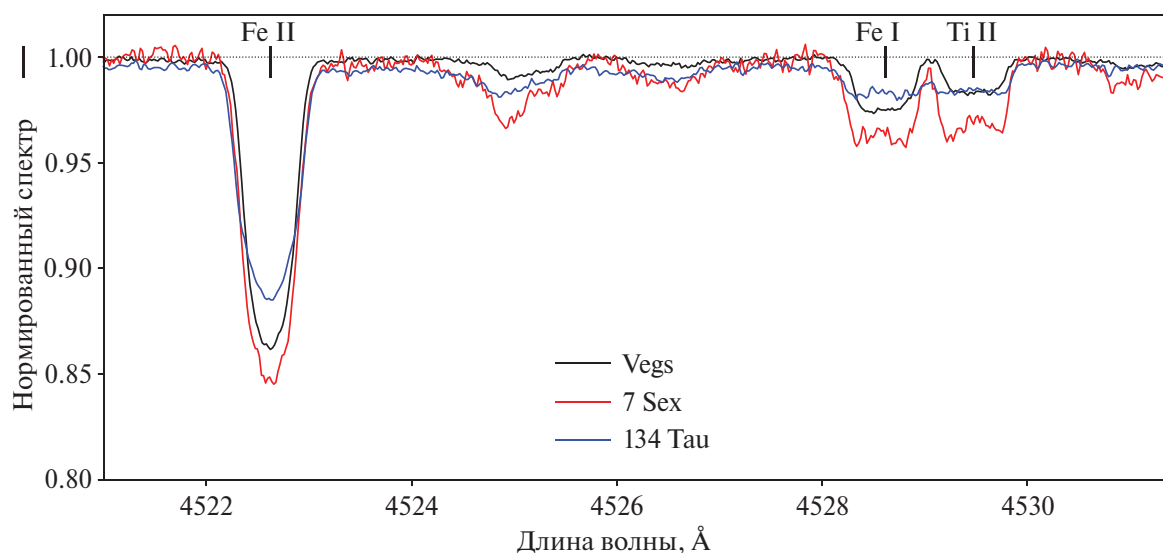


Рис. 3. Наблюдаемые нормированные спектры Веги, 134 Тау, 7 Сек в области от 4521 до 4531 \AA .

Таблица 3. Список линий, использованных для ЛТР и не-ЛТР анализа содержаний для звезд исследования

Ион	Длина волны, Å	E_i , эВ	$\log gf$	Ссылки			Содержание, $\log \epsilon$				
				gf	HFS	IS	v Aql		...	134 Tau	
							ЛТР	не-ЛТР		ЛТР	не-ЛТР
...											
He 1	4471.4730	20.9641	-0.2780	WSG	—	—	—	—	...	11.14	—
He 1	5875.6150	20.9641	0.4090	WSG	—	—	—	—	...	11.22	—
...											
Ba 2	4554.0319	0.0000	0.1700	MW	BBW/VAHW	WABM	2.10	2.08	...	2.41	2.74
Ba 2	4934.0750	0.0000	-0.1500	MW	BWE-BBW/VAHW	WABM	2.49	2.46	...	2.44	2.78
Ba 2	5853.6742	0.6043	-1.0000	MW	VBDsb/VAHW	VBDS	2.22	2.35	...	—	—
...											

Таблица полностью доступна в текстовом формате в онлайн-журнале. Здесь приведена часть таблицы для ознакомления с ее формой и содержанием. Ссылки на константы HFS приведены для нижнего и верхнего уровней. WSG = Визе и др. (1966); MW = Майлс и Визе (1969); BBW = Бекер и др. (1981); VAHW = Виллеума и др. (1993); WABM = Вендт и др. (1984); BWE = Блатт и Верт (1982); VBDsb = ван Хов и др. (1985); VBDS = ван Хов и др. (1982).

ному изменению не-ЛТР поправок для линий Ti II по сравнению с предыдущими расчетами.

Для звезды v Aql определено содержание лития по линии Li I 6707 Å, которая имеет эквивалентную ширину $EW = 22.2$ mÅ. Отметим, что линию лития у этой звезды обнаружили Жербальди и др. (1995) в спектре с низким S/N, но измерили меньшую $EW = 8$ mÅ и содержание лития не определяли. Не-ЛТР расчеты для Li I выполнены с использованием модели атома, построенной Ситновой и др. (2023). Полученное содержание лития $\log \epsilon(\text{Li}) = 3.30$ (ЛТР) и 3.21 (не-ЛТР) согласуется с современным метеоритным значением $\log \epsilon(\text{Li}) = 3.27$ (Лоддерс, 2021) и с содержанием лития у звезд с $T_{\text{eff}} \geq 6800$ К и металличностью, близкой к солнечной (Боесгард и др., 2016; Шарбоннель и др., 2021).

Такеда и др. (2009) получили не-ЛТР содержание Na I для широкой выборки A-звезд и показали, что резонансные линии Na I не могут использоваться в качестве надежного индикатора содержания. Поэтому для звезд из текущей выборки мы приводим значения содержания Na I по одной линии 5682 Å для звезд v Aql и 7 Sex, и по линиям 5682 и 5688 Å для 21 Lyn. Не-ЛТР поправки не превышают 0.11 dex по абсолютной величине.

Содержание He, Al, S II, V, Cr, Mn, Co, Ni, La и Nd определено в предположении ЛТР. Как показали Коротин и Рябчикова (2018), в исследуемом диапазоне параметров атмосфер не-ЛТР ведет к уменьшению содержания гелия не более, чем на 0.04 dex.

В атмосферах исследуемых звезд ионы Al II, S II, V II, Cr II, Mn II, Co II, Ni II доминируют в содержании своего элемента, и их концентрация сохраняет равновесные значения. Поэтому мы ожидаем небольшие отклонения от ЛТР для линий этих ионов, и в качестве окончательного принимаем полученное ЛТР

содержание. Для контроля содержание также определялось по линиям нейтральных атомов Al I, S I, Cr I, Mn I, Ni I, если они присутствовали в спектре. Резонансные линии Al I измерены только у звезды 134 Tau. Как показано в статье Романовской и др. (2023), не-ЛТР поправки для них могут превысить +0.3 dex. Модель атома S I была модернизирована (Коротин и Киселев, 2024) по сравнению с той, что использовалась Романовской и др. (2023). В исследуемом диапазоне параметров атмосфер не-ЛТР поправки для линий S I, которые мы используем для определения содержания серы, не превышают 0.03 dex по абсолютной величине.

Для Cr I, Mn I, Ni I не-ЛТР расчеты в исследуемом диапазоне параметров атмосфер не проводились, но по аналогии с Ti I и Fe I, которые имеют близкие энергии ионизации (между 6.8 и 7.9 эВ), применение не-ЛТР подхода должно вести к ослаблению их спектральных линий и положительным не-ЛТР поправкам к содержанию. Отрицательная разница в ЛТР содержании между нейтральными атомами и первыми ионами свидетельствует в пользу принятых параметров атмосферы звезды.

Небольшие отклонения от ЛТР ожидаются для линий Nd III, которые используются для определения содержания неодима, поскольку Nd III — это доминирующая стадия ионизации в атмосферах с $T_{\text{eff}} > 9400$ К.

3.3. Результаты

Средние содержания для всех элементов в атмосферах звезд выборки приведены в табл. 4 и представлены на рис. 4. Для звезд v Aql, 21 Lyn, HD 145788 и к Сер в случае, когда разница между содержанием, полученным по линиям двух стадий ионизации, превышает 0.20 dex, в качестве среднего значения использовалось содержание, полученное по линиям одно-

Таблица 4. Средние значения содержания химических элементов, полученных с применением ЛТР (L) и не-ЛТР (N) методов для звезд выборки. n_l — число спектральных линий, использованных для расчета содержания. В скобках указано стандартное отклонение. В случае, когда использовалась одна линия — отклонение принято равным 0.2. В последнем столбце указаны современные метеоритные содержания элементов в Солнечной системе из работы Лоддерс (2021)

Звезда		ν Aql			21 Lyn			HD 145788			κ Cep			7 Sex			134 Tau			Солнце
T_{eff}		7960			9650			9800			10250			10195			10253			
$\log g$		4.34			3.75			3.73			3.74			3.70			3.88			
Ион		$\log \epsilon$	[X/H]	n_l	$\log \epsilon$	[X/H]	n_l	$\log \epsilon$	[X/H]	n_l	$\log \epsilon$	[X/H]	n_l	$\log \epsilon$	[X/H]	n_l	$\log \epsilon$	[X/H]	n_l	$\log \epsilon$
He I	L				10.88(06)	−0.04	3	10.91(06)	−0.01	3	11.00(04)	0.08	4	11.04(04)	0.12	4	11.19(07)	0.27	4	10.924
Li I	L	3.30(20)	0.03	1																3.27
Li I	N	3.21(20)	−0.06	1																
C I	L	8.30(09)	−0.17	4	8.28(13)	−0.19	5	8.41(13)	−0.06	4	8.27(13)	−0.20	6	8.91(14)	0.44	7	8.44(17)	−0.03	6	8.47
C I	N	8.27(08)	−0.20	4	8.26(13)	−0.21	5	8.47(09)	0.00	4	8.39(08)	−0.08	6	8.95(12)	0.48	7	8.49(15)	0.02	6	
N I	L										8.17(09)	0.32	12				8.04(07)	0.19	8	7.85
N I	N										7.92(08)	0.07	12				7.79(05)	−0.06	8	
O I	L	8.71(07)	−0.02	4	8.67(05)	−0.06	9	8.88(11)	0.12	11	9.06(44)	0.33	14	9.04(09)	0.31	15	9.07(45)	0.34	16	8.73
O I	N	8.69(08)	−0.04	4	8.62(05)	−0.11	9	8.73(09)	0.00	11	8.70(05)	−0.03	14	8.92(07)	0.19	15	8.61(13)	−0.12	16	
Ne I	L													8.58(20)	0.43	1	8.70(08)	0.55	9	8.15
Ne I	N													8.38(20)	0.23	1	8.53(10)	0.38	9	
Na I	L	6.23(20)	−0.04	1	6.43(07)	0.16	2							7.01(20)	0.74	1				6.27
Na I	N	6.14(01)	−0.13	1	6.32(07)	0.05	2							6.90(20)	0.63	1				
Mg I	L	7.38(12)	−0.14	7	7.54(14)	0.02	6	7.81(18)	0.29	7	7.86(32)	0.34	8	8.06(17)	0.54	7	7.52(21)	0.00	8	7.52
Mg I	N	7.34(10)	−0.18	7	7.44(02)	−0.08	6	7.71(05)	0.19	7	7.68(11)	0.16	8	7.98(07)	0.46	7	7.49(18)	−0.03	8	
Mg II	L	7.55(15)	0.03	4	7.39(13)	−0.13	4	7.64(13)	0.12	5	7.67(16)	0.15	11	7.78(17)	0.26	6	7.58(14)	0.06	6	
Mg II	N	7.52(19)	0.00	4	7.34(04)	−0.18	4	7.60(07)	0.08	5	7.60(08)	0.08	11	7.75(12)	0.23	6	7.56(10)	0.04	6	
[Mg/H] _{mean}	N	−0.11(17)			−0.12(06)			0.15(08)			0.11(10)			0.36(15)			0.00(15)			
Al I	L																6.06(04)	−0.36	2	6.42
Al II	L	6.60(20)	0.18	1	6.47(03)	0.05	3	6.63(04)	0.21	3	6.48(04)	0.06	3	6.55(09)	0.13	3	6.37(03)	−0.05	3	
[Al/H] _{mean}	L	0.18(20)			0.05(03)			0.21(04)			0.06(04)			0.13(09)			−0.17(16)			
Si I	L	7.40(20)	−0.11	1	7.15(20)	−0.36	1				7.07(20)	−0.44	1							7.51
Si I	N	7.39(20)	−0.12	1	7.45(20)	−0.06	1				7.55(20)	0.04	1							
Si II	L	7.48(09)	−0.03	4	7.52(19)	0.01	9	7.77(18)	0.26	11	7.65(16)	0.14	13	7.95(20)	0.44	10	7.77(21)	0.26	12	
Si II	N	7.39(09)	−0.12	4	7.36(08)	−0.15	9	7.56(12)	0.05	11	7.54(16)	0.03	13	7.78(12)	0.27	10	7.66(18)	0.15	12	
[Si/H] _{mean}	N	−0.12(08)			−0.14(08)			0.05(12)			0.03(16)			0.27(12)			0.15(18)			
S I	L	7.07(15)	−0.08	4	7.44(07)	0.29	2							7.89(24)	0.74	3	7.44(02)	0.29	2	7.15
S I	N	7.05(16)	−0.10	4	7.44(07)	0.29	2							7.91(24)	0.76	3	7.47(02)	0.32	2	
S II	L				7.35(11)	0.20	2	7.34(07)	0.19	3	7.19(17)	0.04	6	7.51(12)	0.36	7	7.21(12)	0.06	8	
[S/H] _{mean}	L	−0.10(16)			0.25(09)			0.19(07)			0.04(17)			0.47(24)			0.10(14)			
Ca I	L	6.18(07)	−0.09	12	6.24(13)	−0.03	6	6.46(09)	0.19	6	6.21(20)	−0.06	1	7.09(33)	0.82	4	6.01(20)	−0.26	1	6.27
Ca I	N	6.13(09)	−0.14	12	6.46(10)	0.19	6	6.68(07)	0.41	6	6.68(20)	0.41	1	7.36(29)	1.09	4	6.44(20)	0.17	1	
Ca II	L	6.29(08)	0.02	6	6.21(05)	−0.06	5	6.38(09)	0.11	6	6.14(12)	−0.13	10	6.62(10)	0.35	7	6.14(10)	−0.13	11	
Ca II	N	6.27(08)	0.00	6	6.38(04)	0.11	5	6.56(08)	0.29	6	6.50(09)	0.23	10	6.86(14)	0.59	7	6.46(07)	0.19	11	
[Ca/H] _{mean}	N	−0.09(11)			0.16(19)			0.35(10)			0.25(10)			0.77(32)			0.19(07)			
Sc II	L	3.02(04)	−0.02	8	2.79(06)	−0.25	8	3.09(06)	0.05	9	2.83(04)	−0.21	5	3.48(12)	0.44	7	2.73(12)	−0.31	5	3.04
Sc II	N	3.01(07)	−0.03	8	3.17(05)	0.13	8	3.42(05)	0.38	9	3.35(01)	0.31	5	3.99(10)	0.95	7	3.33(11)	0.29	5	
Ti II	L	4.93(09)	0.03	38	4.88(05)	−0.02	41	5.12(06)	0.22	37	5.03(07)	0.13	31	5.27(10)	0.37	34	4.76(09)	−0.14	30	4.90
Ti II	N	4.90(08)	0.00	38	4.86(05)	−0.04	41	5.09(05)	0.19	37	5.01(08)	0.11	31	5.23(12)	0.33	34	4.74(11)	−0.16	30	
V II	L	4.02(06)	0.07	6	4.08(08)	0.13	6	4.24(10)	0.29	6	4.02(08)	0.07	3	4.29(09)	0.34	7	3.89(20)	−0.06	5	3.95
Cr I	L	5.45(12)	−0.18	7	5.70(05)	0.07	7	5.86(08)	0.23	6	5.75(08)	0.12	2	6.23(13)	0.60	4	5.75(11)	0.12	6	5.63
Cr II	L	5.63(13)	0.00	30	5.71(08)	0.08	41	5.87(07)	0.24	38	5.79(08)	0.16	32	6.01(13)	0.38	32	5.62(07)	−0.01	30	
[Cr/H] _{mean}	L	−0.03(15)			0.07(09)			0.24(07)			0.16(08)			0.40(15)			0.01(09)			
Mn I	L	5.07(08)	−0.40	5	5.57(15)	0.10	8	5.57(11)	0.10	4				6.07(25)	0.60	5	5.41(18)	−0.06	3	5.47
Mn II	L	5.63(20)	0.16	1	5.58(07)	0.11	5	5.68(04)	0.21	5	5.53(07)	0.06	3	5.71(12)	0.24	5	5.28(23)	−0.19	3	
[Mn/H] _{mean}	L	−0.31(22)			0.10(13)			0.16(10)			0.06(07)			0.42(26)			−0.12(22)			
Fe I	L	7.30(10)	−0.15	23	7.45(07)	0.00	29	7.61(07)	0.16	27	7.47(08)	0.02	11	7.95(12)	0.50	28	7.40(11)	−0.05	15	7.45
Fe I	N	7.25(10)	−0.20	23	7.54(07)	0.09	29	7.71(07)	0.26	27	7.60(08)	0.15	11	8.07(13)	0.62	28	7.52(12)	0.07	15	
Fe II	L	7.34(13)	−0.11	35	7.48(07)	0.03	69	7.67(08)	0.22	68	7.51(10)	0.06	70	7.75(10)	0.30	70	7.46(10)	0.01	67	
Fe II	N	7.33(14)	−0.12	35	7.48(07)	0.03	69	7.66(08)	0.21	68	7.52(10)	0.07	70	7.76(10)	0.31	70	7.47(11)	0.02	67	
[Fe/H] _{mean}	N	−0.15(13)			0.05(08)			0.23(08)			0.08(10)			0.40(18)			0.03(11)			
Co II	L				5.31(10)	0.45	2	5.29(20)	0.43	1	4.84(20)	−0.01	1							4.86
Ni I	L	6.09(17)	−0.11	6	6.56(09)	0.36	16	6.74(10)	0.54	13	6.35(02)	0.15	2	6.81(03)	0.61	2				6.20
Ni II	L	6.03(20)	−0.17	1	6.64(07)	0.44	7	6.71(09)	0.51	5				6.65(12)	0.45	8	6.26(06)	0.06	3	
[Ni/H] _{mean}	L	−0.11(16)			0.39(09)			0.53(10)			0.15(02)			0.48(13)			0.06(06)			
Zn I	L	4.25(12)	−0.36	3	5.27(07)	0.66	3	5.17(04)	0.56	2	4.89(16)	0.28	2	5.12(20)	0.51	1				4.61
Zn I	N	4.32(11)	−0.29	3	5.41(07)	0.80	3	5.32(03)	0.71	2	5.03(16)	0.42	2	5.25(20)	0.64	1				
Sr II	L	3.04(01)	0.16	2	3.31(01)	0.43	3	3.20(06)	0.32	4	2.77(01)	−0.11	2	3.03(16)	0.15	3	2.43(01)	−0.45	2	2.88
Sr II	N	2.95(01)	0.07	2	3.77(04)	0.89	3	3.68(06)	0.80	4	3.41(03)	0.53	2	3.55(10)	0.67	3	3.08(02)	0.20	2	
Y II	L	2.35(10)	0.20	11	2.69(08)	0.54	8	2.58(09)	0.43	6	2.20(26)	0.05	4	2.74(02)	0.59	3	2.21(06)	0.06	2	2.15
Y II	N	2.34(10)	0.19	11	3.26(05)	1.11	8	3.16(05)	1.01	6	2.89(20)	0.74	4	3.40(08)	1.25	3	2.93(01)	0.78	2	
Zr II	L	2.71(12)	0.16	5	3.20(04)	0.65	5	3.08(09)	0.53	3	2.71(14)	0.16	3	3.00(20)	0.45	1	2.44(20)	−0.11	1	2.55
Zr II	N	2.75(11)	0.20	5	3.49(03)	0.94	5	3.41(08)	0.86	3	3.19(15)	0.64	3	3.43(20)	0.88	1	2.88(20)	0.33	1	
Ba II	L	2.30(14)	0.13	4	3.03(09)	0.86	5	2.89(10)	0.72	3	2.41(09)	0.24	3	2.81(21)	0.64	3	2.17(02)	0.00	2	2.17
Ba II	N	2.31(14)	0.14	4	3.36(08)	1.19	5	3.23(10)	1.06	3	2.80(10)	0.63	3	3.17(21)	1.00	3	2.53(02)	0.36	2	
Nd III	L				2.32(12)	0.87	3				1.95(12)	0.50	3							1.45

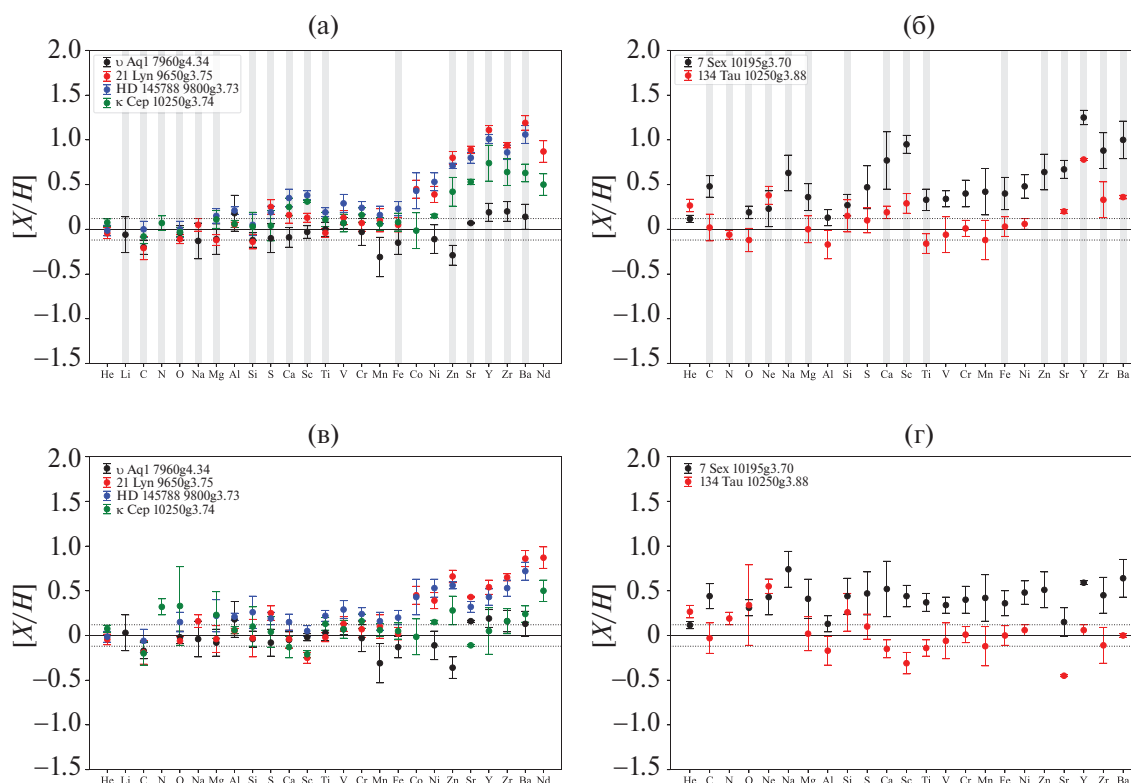


Рис. 4. Среднее содержание химических элементов звезд выборки относительно метеоритного содержания в Солнечной системе, взятого из работы Лоддерс (2021). Пунктирными линиями указан диапазон ± 0.12 dex, соответствующий 3σ ошибке определения содержания в солнечной системе. (а), (б) — химический состав в не-ЛТР приближении, (в), (г) — в ЛТР.

кратно ионизованного элемента. В остальных случаях и для быстровращающихся звезд 7 Sex и 134 Tau указаны средние значения по всем стадиям ионизации. Мы разделили звезды на две группы: А-В звезды с низкой скоростью вращения показаны на рис. 4а, 4в, а быстровращающиеся звезды — на рис. 4б, 4г. Не-ЛТР содержания показаны на верхних графиках (рис. 4а, 4б), а ЛТР — на нижних (рис. 4в, 4г).

Нормальные звезды. Не-ЛТР анализ химического состава для звезд ν Aql, κ Cep и 21 Lyn подтверждает принадлежность звезд к нормальным А-звездам. Нормальными считаются звезды с содержанием химических элементов от He до Fe, близким к солнечным значениям в пределах $3\sigma = \pm 0.12$ dex определения содержания в атмосфере Солнца.

В спектре звезды ν Aql, кроме Li и Na, одной линией представлены также ионы Al II $\lambda 4663$ Å, Mn II $\lambda 4205$ Å, Ni II $\lambda 4067$ Å. $[X/H]_{\text{Element}}$ для вышеприведенных линий не превышает 0.2 dex относительно солнечных значений. В звезде наблюдаются самые низкие по сравнению с остальными нормальными звездами содержания элементов Na, Ca, Sc, Cr, Mn, Fe, Ni.

Элементы Zn, Sr, Y, Zr, Ba будут рассмотрены ниже. Средняя металличность для элементов от He до Fe в звезде составляет -0.07 ± 0.11 .

В спектре 21 Lyn нейтральный кремний представлен одной линией $\lambda 6155$ Å. Учет не-ЛТР эффектов поз-

волил достичь ионизационного равновесия Si I/Si II: различие в содержаниях составило 0.09 dex. Относительно Солнца кремний в небольшом дефиците: -0.14 dex. В 21 Lyn наблюдается наибольший из всех звезд дефицит углерода: -0.21 dex при отказе от ЛТР. Средняя металличность для элементов от He до Fe в звезде для модели атмосферы 9650g3.75: 0.02 ± 0.13 . Мы подтверждаем вывод Ройера и др. (2014), что звезда относится к нормальным А звездам.

Звезда HD 145788, которая имеет спорный статус в литературе, показывает немного завышенное содержание элементов железного пика и избыток Ca и Sc до 0.38 dex относительно Солнца. Кобальт представлен одной линией Co II $\lambda 4160$ Å с завышенным содержанием относительно Солнца, на 0.43 dex. Фоссати и др. (2009) предположили, что звезда образовалась в области повышенной металличности.

Мы получили, что у HD 145788 средняя металличность для элементов от He до Fe: 0.17 ± 0.13 . HD 145788 показывает небольшое превышение содержания относительно солнечного практически для всех элементов группы железа. Мы предполагаем, что HD 145788 находится на стадии превращения в Am звезду. Признаком Am звезды принято считать дефицит Ca и Sc (Конти, 1970). Но этот классификационный критерий был выработан в результате анализа данных, полученных в предположении ЛТР. Не-ЛТР

расчеты Машонкиной (2024) показали, что у А-звезд не-ЛТР поправки для линий Sc II — положительные и растут с ростом T_{eff} , так что у Am-звезд с $T_{\text{eff}} > 9300$ K, $\log g < 4$ и Ca, и Sc имеют содержание выше солнечного (Машонкина и Фадеев, 2024). Параметры атмосферы HD 145788 находятся именно в этом диапазоне.

В спектре к Сер наблюдаются по одной линии у элементов Si I 3905 Å, Ca I 4226 Å, и Co II 4145 Å. Содержание химических элементов в к Сер близко к солнечным значениям до Ni включительно, кроме завышенного содержания Ca и Sc на 0.25 и 0.31 dex соответственно. Для остальных элементов значения относительно Солнца находятся в пределах ошибок определения. Средняя металличность для элементов от He до Fe в звезде составляет 0.09 ± 0.10 .

В статьях Машонкиной и др. (2020) и Романовской и др. (2023) было показано наличие зависимости содержания Zn, Sr, Y, Zr, Ba от эффективной температуры в атмосферах нескольких нормальных звезд: с увеличением T_{eff} от 7200 до 10 000 K избытки содержания растут до 1.2 dex относительно солнечных значений, а затем падают практически до нуля при $T_{\text{eff}} = 13\,000$ K. В настоящей работе мы дополнили выборку звезд в отсутствующих диапазонах T_{eff} (8000–9000 K и 9500–12 000 K) и на основании детального не-ЛТР анализа показали, что избытки тяжелых элементов в исследуемых звездах соответствуют ожидаемым значениям для данных температур (рис. 5). Впервые получена такая же зависимость содержаний двух других элементов Co и Ni от эффективной температуры с максимумом избытка до 0.6 dex в области 9500–10 000 K (рис. 5 слева). В более холодных звездах наблюдается дефицит кобальта и никеля, затем содержание относительно солнечного растет до максимального значения 0.6 dex при 9500 K, и при дальнейшем повышении T_{eff} до 10 500 K содержание элементов уменьшается.

Как было упомянуто во Введении, одним из основных процессов возникновения аномалий в атмосферах звезд Главной последовательности с малыми скоростями вращения $V < 120$ км с^{−1} (Абт, 2000) явля-

ется атомная диффузия. Для детального расчета диффузионных моделей звездной эволюции необходимо иметь данные по монохроматическим поглощениям для огромного количества линий элементов в различных стадиях ионизации, позволяющие рассчитывать радиационное давление на различных глубинах. Современные диффузионные модели звездной эволюции основываются на расчетах монохроматических поглощений только для 17 элементов, из которых самыми тяжелыми являются Fe и Ni (Ситон, 2005). Рассчитанное содержание Fe в моделях звезд различного возраста и эффективной температуры согласуется с наблюдаемым отсутствием каких-либо корреляций содержания с эффективной температурой в нормальных звездах (Машонкина и Фадеев, 2024). Задачей на будущее является проведение диффузионных расчетов для Ni — одного из первых тяжелых элементов, содержание которого коррелирует с T_{eff} в нормальных звездах, и для которого есть расчеты монохроматических поглощений. Для более тяжелых элементов (Zn, Sr, Y, Zr, Ba), к сожалению, данных для диффузионных расчетов недостаточно.

Звезды, наблюдаемые с полюса. Несмотря на неопределенности моделирования атмосфер быстровращающихся звезд 134 Tau и 7 Sex, мы провели анализ их спектров. Полученный химический состав с учетом не-ЛТР для звезд приведен на рис. 4б–4г. Для 134 Tau получены содержания химических элементов, близкие к солнечным значениям в пределах ошибок определения, за исключением He, Sc и тяжелых элементов. Средняя металличность от He до Fe: 0.05 ± 0.17 , что указывает на принадлежность звезды к нормальным А-звездам. Для 7 Sex, несмотря на схожие значения T_{eff} , полученные методами SME и SED, получено нарушение ионизационного равновесия (см. табл. 4). Средняя металличность звезды 0.40 ± 0.22 , что указывает на возможную принадлежность к группе Am-звезд с усиленными линиями металлов. Однако, как было указано в разделе 2, использование модели атмосферы с учетом

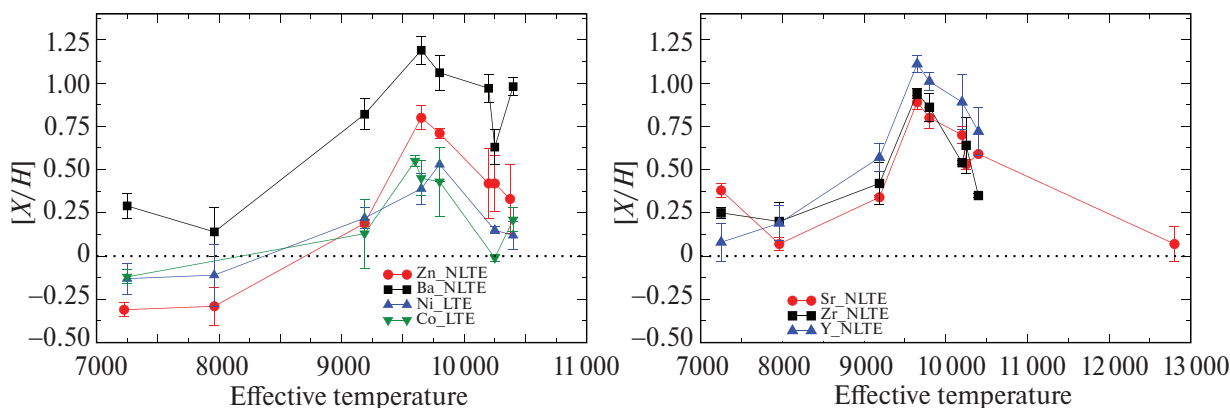


Рис. 5. Температурное поведение содержания Co, Ni и более тяжелых элементов в нормальных А-звездах.

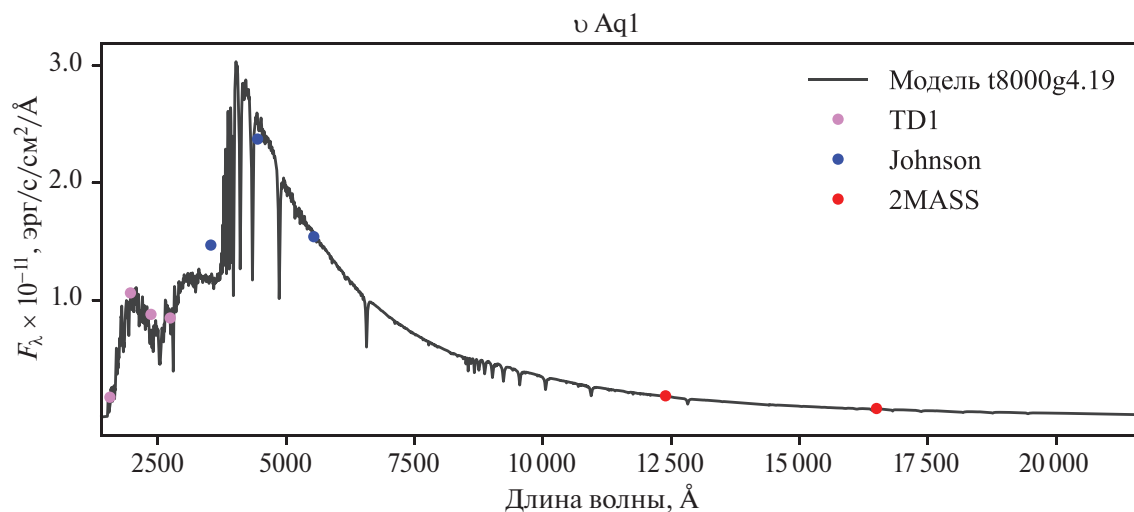


Рис. 6

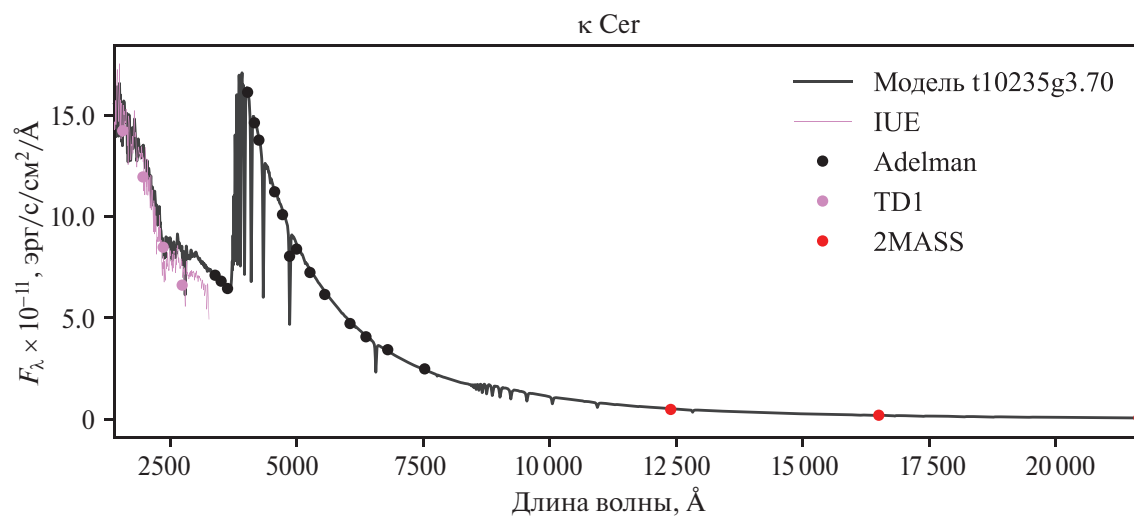


Рис. 7

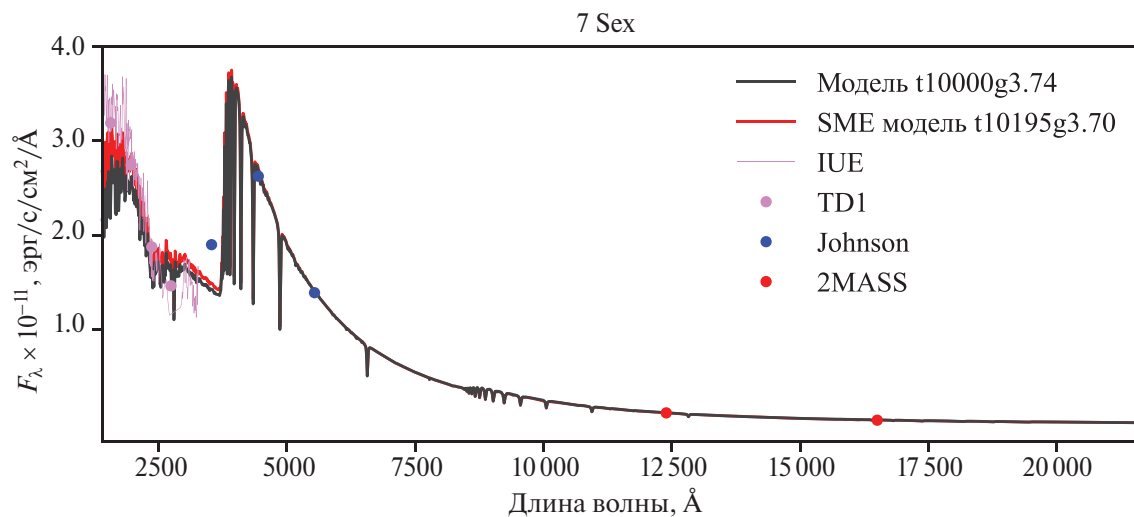


Рис. 8

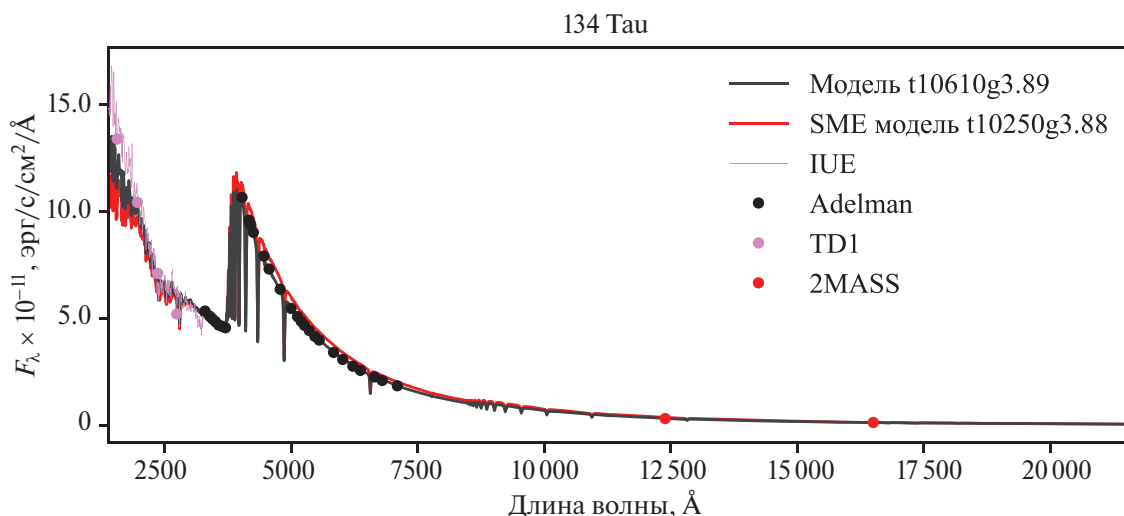


Рис. 9

несферичности звезды может привести к изменению картины химического состава в исследуемых звездах.

Стоит отметить, что для 134 Tau в статье Романовской и др. (2023) приводились значения для Sr и Ba с моделью атмосферы 10825g3.88, взятой из работы Адельмана (1991). В настоящей статье мы не приводим обновленные значения, полученные с двумя моделями атмосфер, по причине, описанной выше.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мы увеличили выборку нормальных звезд с узкими спектральными линиями и эффективными температурами в диапазоне 8000–10 700 K, для которых проведен самосогласованный анализ содержания химических элементов от He до Nd.

Фундаментальные параметры атмосфер были определены по спектрам с помощью пакета SME и по спектральному распределению энергии. Представлены содержания для 25 элементов, для 18 из них содержания были получены с учетом отклонений от ЛТР. Для наиболее холодной звезды определено содержание Li, которое оказалось близким к метеоритному. Показано, что применение не-ЛТР подхода уменьшает неопределенность полученных содержаний, в частности, для легких элементов.

С учетом результатов, представленных в статьях Машонкиной и др. (2020), Романовской и др. (2023) и полученных в настоящей работе для ν Aql, 21 Lyn и κ Ser, мы можем сделать вывод, что признаком нормальных А-звезд является согласие содержания элементов от He до Fe с солнечными значениями. У этих же звезд более тяжелые элементы могут иметь содержание выше солнечного, что предположительно может являться проявлением эффектов атомной диффузии, и величина избытка коррелирует с T_{eff} .

Уточнена классификация HD 145788, которая имеет спорный статус в литературе: мы полагаем, что этот

объект находится на начальной стадии превращения в Am-звезду.

Профили спектральных линий у 7 Sex и 134 Tau свидетельствуют о том, что это быстро вращающиеся звезды, наблюдаемые с полюса. Анализ их спектров требует специальных методов.

Подтверждено наличие корреляции избытков элементов Zn, Sr, Y, Zr, Ba в атмосферах нормальных А-звезд с эффективной температурой, и впервые получена такая же зависимость для Co и Ni с максимумом избытка 0.6 dex в области 9500–10 000 K.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят С.А. Алексееву за предоставленные результаты не-ЛТР расчетов для Ne 1 и С.А. Коротина за предоставленные результаты не-ЛТР расчетов для S 1. В работе были использованы наблюдения, полученные со спектрографом HERMES, установленном на телескопе Меркатор обсерватории Роке де лос Мучачос Института астрофизики Канарских островов (Испания).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абт (H.A. Abt), *Astrophys. J.* **544**, 933 (2000).
2. Абт (H.A. Abt), *Astron. J.* **138**, 28 (2009).
3. Адельман и др. (S.J. Adelman, D.M. Pyper, S.N. Shore, R.E. White, and W.H. Warren), *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* **81**, 221 (1989).
4. Адельман (S.J. Adelman), *MNRAS* **252**, 116 (1991).
5. Адельман, Филип (S.J. Adelman and A.G.D. Philip), *PASP* **104**, 316 (1992).
6. Адельман и др. (S.J. Adelman), *MNRAS* **271**, 355 (1994).
7. Адельман, Пинтадо (S.J. Adelman and O.I. Pintado), *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* **125**, 219 (1997).
8. Адельман, Пинтадо (S.J. Adelman and O.I. Pintado), *Astron. Astrophys.* **354**, 899 (2000).

9. Адельман и др. (S.J. Adelman, O.I. Pintado, M.F. Nieva, K.E. Rayle, and S.E. Sanders), *Astron. Astrophys.* **392**, 1031 (2002).
10. Адельман и др. (S.J. Adelman, K. Yu, and A.F. Gulliver), *Astronomische Nachrichten* **332**, 153 (2011).
11. Батлер, Гиддингс (K. Butler and J. Giddings), *Newsletter on the analysis of astronomical spectra* (University of London, 1985).
12. Бекер и др. (W. Becker, R. Blatt, and G. Werth), *Precision Measurement and Fundamental Constants* **99** (1981).
13. Блатт, Верт (R. Blatt and G. Werth), *Phys. Rev. A* **25**, 1476 (1982).
14. Боегсгор и др. (A.M. Boesgaard, M.G. Lum, C.P. Deliyannis, J.R. King, M.H. Pinsonneault, and G. Somers), *Astrophys. J.* **830**, 49 (2016).
15. ван Хов и др. (M. van Hove, G. Borghs, P. de Bisschop, and R.E. Silverans), *Zeitschrift fur Physik A Hadrons and Nuclei* **321**, 215 (1985).
16. ван Хов и др. (M. Van Hove, G. Borghs, P. DeBisschop, and R.E. Silverans), *J. Phys. B Atom. Molec. Phys.* **15**, 1805 (1982).
17. Ватсон (W.D. Watson), *Astrophys. J. (Lett.)* **162**, L45 (1970).
18. Вендт и др. (K. Wendt, S.A., Ahmad, F. Buchinger, A.C. Mueller, R. Neugart, and E.-W. Otten), *Zeitschrift fur Physik A Hadrons and Nuclei* **318**, 125 (1984).
19. Визе и др. (W.L. Wiese, M.W. Smith, and B.M. Glennon), *NSRDS-NBS* **4**, (1966).
20. Виллемуа и др. (P. Villemoes, A. Arnesen, F. Heijkenskjold, and A. Wannstrom), *J. Phys. B Atom. Molec. Phys.* **26**, 4289 (1993).
21. Gaia Collaboration (Gaia Collaboration), *VizieR Online Data Catalog* **1350**, (2020).
22. Гарсия Перес и др. (A.E. Garcia Perez, P. Sanchez-Blazquez, A. Vazdekis, C. Allende Prieto, A. de C. Milone, A.E. Sansom, J. Gorgas, J. Falcon-Barroso, I. Martin Navarro, and R. Cacho), *MNRAS* **505**, 4496 (2021).
23. Гебран и др. (M. Gebran, W. Farah, F. Paletou, R. Monier, and V. Watson), *Astron. Astrophys.* **589**, A83 (2016).
24. Глаголевский (Yu.V. Glagolevskij), *Bull. Spec. Astrophys. Observ.* **38**, 152 (1994).
25. Грин и др. (G.M. Green, E.F. Schlafly, D. Finkbeiner, H.-W. Rix, N. Martin, W. Burgett, P.W. Draper, H. Flewelling, et. al), *MNRAS* **478**, 651 (2018).
26. Дукати (J.R. Ducati), *VizieR Online Data Catalog* 2237, (2002).
27. Жербальди и др. (M. Gerbaldi, R. Faraggiana, and F. Castelli), *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* **111**, 1 (1995).
28. Зорес и Ройер (J. Zorec and F. Royer), *Astron. Astrophys.* **537**, A120 (2012).
29. Каули и др. (A. Cowley, C. Cowley, M. Jaschek, and C. Jaschek), *Astron. J.* **74**, 375 (1969).
30. Конти (P.S. Conti), *Publ. Astron. Soc. Pacific* **82**, 781 (1970).
31. Коротин, Киселев (С.А. Коротин, К.О. Киселев), *Астрон. журн.*, в печати (2024).
32. Коротин, Рябчикова (С.А. Коротин, Т.А. Рябчикова), *Письма в Астрон. журн.* **44**, 679 (2018).
33. Кочухов (O. Kochukhov), *Astrophys. Source Code Library*, ascl:1805.015 (2018).
34. Коэн и др. (M. Cohen, W.A. Wheaton, and S.T. Megeath), *Astron. J.* **126**, 1090 (2003).
35. Кутри и др. (R.M. Cutri et al.), *2MASS All Sky Catalog of point sources. The IRSA 2MASS All-Sky Point Source Catalog* (2003).
36. Лаллемент и др. (R. Lallement, J.-L. Vergely, B. Valette, L. Puspitarini, L. Eyer, and L. Casagrande), *Astron. Astrophys.* **561**, A91 (2014).
37. Лоддерс (K. Lodders), *Space Sci. Rev.* **217**, 44 (2021).
38. Майлс, Визе (B.M. Miles and W.L. Wiese), *Atomic Data* **1**, 1 (1969).
39. Машонкина (L. Mashonkina), *MNRAS* **527**, 8234 (2024).
40. Машонкина и др. (L. Mashonkina, T. Ryabchikova, S. Alexeeva, T. Sitnova, and O. Zatsarinny), *MNRAS* **499**, 3706 (2020).
41. Машонкина, Фадеев (Л.И. Машонкина и Ю.А. Фадеев), *Письма в Астрон. журн.* **50** 379 (2024).
42. Машонкина, Рябчикова (Л.И. Машонкина и Т.А. Рябчикова), *Письма в Астрон. журн.* **50** 395 (2024).
43. Морел и др. (T. Morel, A. Blazere, T. Semaan, et al.), *Astron. Astrophys.* **665**, A108 (2022).
44. Мишо (G. Michaud), *Astrophys. J.* **160**, 641 (1970).
45. Мишо и др. (G. Michaud, G. Alecian, and J. Richer), *Atomic Diffusion in Stars* (2015).
46. Пискунов, Валенти (N. Piskunov and J.A. Valenti), *Astron. Astrophys.* **597**, A16 (2017).
47. Прюньель и др. (Ph. Prugniel, I. Vauglin, and M. Koleva), *Astron. Astrophys.* **531**, A165 (2011).
48. Пшибылла и др. (N. Przybilla, M.-F. Nieva, and K. Butler), *J. Phys. Conf. Ser.* **328**, 012015 (2011).
49. Раскин и др. (G. Raskin, H. van Winckel, H. Hensberge, A. Jorissen, H. Lehmann, C. Waelkens, G. Avila, J.-P. de Cuypere, P. Degroote, R. Dubosson, L. Dumortier, Y. Fremat, U. Laux, B. Michaud, J. Morren, J. Perez Padilla, W. Pessemier, S. Prins, K. Smolders, S. van Eck, and J. Winkler), *Astron. Astrophys.* **526**, A69 (2011).
50. Ренсон, Манфруа (P. Renson and J. Manfroid), *Astron. Astrophys.* **498**, 961 (2009).
51. Ройер и др. (F. Royer, M. Gebran, R. Monier, S. Adelman, B. Smalley, O. Pintado, A. Reiners, G. Hill, and A. Gulliver), *Astron. Astrophys.* **562**, A84 (2014).
52. Романовская и др. (А.М. Romanovskaya, Т.А. Ryabchikova, Yu.V. Pakhomov, S.A. Korotin, and T.M. Sitnova), *MNRAS* **526**, 3386 (2023).
53. Сенарро и др. (A.J. Cenarro, R.F. Peletier, P. Sanchez-Blazquez, S.O. Selam, E. Toloba, N. Cardiel, J. Falcon-Barroso, J. Gorgas, J. Jimenez-Vicente, and A. Vazdekis), *MNRAS* **374**, 664 (2007).
54. Ситнова и др. (T.M. Sitnova, T. Matsuno, Z. Yuan, N.F. Martin, P. Banerjee, F. Sestito, K.A. Venn, and J.I. Gonzalez Hernandez), *MNRAS* **526**, 5976 (2023).
55. Ситон (M.J. Seaton), *MNRAS* **362**, L1 (2005).
56. Смит, Дворецкий (K.C. Smith and M.M. Dworetsky), *Astron. Astrophys.* **274**, 335 (1993).
57. Таял, Зацаринный (S.S. Tayal and O. Zatsarinny), *Astrophys. J.* **905**, 101 (2020).
58. Такеда и др. (Y. Takeda, D.-I. Kang, I. Han, B.-C. Lee, and K.-M. Kim), *Publ. Astron. Soc. Japan* **61**, 1165 (2009).

59. Такеда (Y. Takeda), arXiv e-prints arXiv:2110.12110 (2021).
60. Томпсон и др. (G.I. Thompson, K. Nandy, C. Jamar, A. Monfils, L. Houziaux, D.J. Carnochan, and R. Wilson), Catalogue of stellar ultraviolet fluxes. A compilation of absolute stellar fluxes measured by the Sky Survey Telescope (S2/68) aboard the ESRO satellite TD-1 (1978).
61. Фитцпатрик (E.L. Fitzpatrick), Publ. Astron. Soc. Pacific **111**, 63 (1999).
62. Фоссати и др. (L. Fossati, T. Ryabchikova, S. Bagnulo, E. Alecian, J. Grunhut, O. Kochukhov, and G. Wade), Astron. Astrophys. **503**, 945 (2009).
63. Хилл и др. (G. Hill, A.F. Gulliver, and S.J. Adelman), Astrophys. J. **712**, 250 (2010).
64. Хог и др. (E. Høg, C. Fabricius, V.V. Makarov, S. Urban, T. Corbin, G. Wycoff, U. Bastian, P. Schwkendiek, and A. Wicenec), Astron. Astrophys. **355**, L27 (2000).
65. Хурихан и др. (A. Hourihane, P. Francois, C.C. Worley, et al.), Astron. Astrophys. **676**, A129 (2023).
66. Цымбал и др. (V. Tsymbal, T. Ryabchikova, and T. Sitnova), Phys. Magnet. Star. **518**, 247 (2019).
67. Шарбоннель и др. (C. Charbonnel, S. Borisov, P. de Laverny, and N. Prantzos), Astron. Astrophys. **649**, L10 (2021).
68. Шуляк (D. Shulyak, V. Tsymbal, T. Ryabchikova, Ch. Stutz, and W.W. Weiss), Astron. Astrophys. **428**, 993 (2004).
69. Эрспамер, Норт (D. Erspamer and P. North), Astron. Astrophys. **398**, 1121 (2003).