

СОДЕРЖАНИЕ СКАНДИЯ У F-G-K ЗВЕЗД В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ МЕТАЛЛИЧНОСТИ

© 2022 г. Л. И. Машонкина^{1*}, А. М. Романовская^{1**}

¹Институт астрономии РАН, Москва, Россия

Поступила в редакцию 13.07.2022 г.

После доработки 03.08.2022 г.; принята к публикации 03.08.2022 г.

Построена новая модель атома Sc II с использованием современных атомных данных. С целью ее тестирования проведены расчеты при отказе от предположения о локальном термодинамическом равновесии (не-ЛТР) для трех звезд с надежно определенными параметрами атмосфер — Солнца, HD 61421 (Процион) и HD 84937. Учет отклонений от ЛТР ведет к уменьшению среднеквадратичной ошибки определения содержания по сравнению со случаем ЛТР и согласию в пределах этой ошибки содержания, получаемого по разным линиям Sc II. Солнечное не-ЛТР содержание $\log \varepsilon_{\text{Sun}} = 3.12 \pm 0.05$ на 0.08 dex превышает метеоритное содержание, рекомендованное Лоддерс (2021). Но согласие в пределах 0.02 dex с метеоритным содержанием получено для Проциона. По спектрам высокого разрешения определено ЛТР и не-ЛТР содержание скандия для 56 звезд в широком диапазоне металличности: $-2.62 \leq [\text{Fe}/\text{H}] \leq 0.24$. Зависимость $[\text{Sc}/\text{Fe}]$ от $[\text{Fe}/\text{H}]$ демонстрирует сходство с поведением элементов α -процесса: у звезд с $[\text{Fe}/\text{H}] < -1$ наблюдается избыток скандия относительно железа ($[\text{Sc}/\text{Fe}] \sim 0.2$), и он уменьшается с ростом $[\text{Fe}/\text{H}]$ в области более высокой металличности. Содержание скандия коррелирует с содержанием титана. Полученные результаты важны для решения проблемы происхождения скандия.

Ключевые слова: атмосферы звезд, формирование спектральных линий в неравновесных условиях, содержание скандия в звездах.

DOI: 10.31857/S0320010822080058

1. ВВЕДЕНИЕ

С содержанием скандия в звездах связано несколько проблем.

Определения содержания Sc в атмосфере Солнца дают значения, различающиеся между собой более, чем на 2σ : от $\log \varepsilon_{\text{Sun}} = 3.07 \pm 0.04$ (Жанг и др., 2008) до $\log \varepsilon_{\text{Sun}} = 3.16 \pm 0.04$ (Скотт и др., 2015), и превышающие метеоритное содержание $\log \varepsilon_{\text{met}} = 3.04 \pm 0.03$ (Лоддерс, 2021). Здесь и далее используется шкала содержания, в которой $\log \varepsilon(\text{H}) = 12$.

Скандий демонстрирует различное поведение у звезд спектрального класса A с содержанием железа, близким к солнечному ($[\text{Fe}/\text{H}]^1 \sim 0$, нормальные A звезды), и у немагнитных A звезд с сильными линиями металлов (Am звезды, $[\text{Fe}/\text{H}] \lesssim 0.5$). Но

Sc не относится к металлам с сильными линиями. Наоборот, у Am звезд наблюдается дефицит Sc, который может достигать порядка величины (Адельман и др., 2000, и ссылки в их статье). Поэтому содержание скандия играет ключевую роль при классификации звезды, как Am. Но остаются непонятными причины различного поведения Sc и элементов группы Fe у звезд A типа.

Не решена проблема синтеза Sc. Согласно недавним моделям химической эволюции Галактики (Кобаяши и др., 2020), основным источником Sc на протяжении жизни Галактики были сверхновые II типа (SNeII) и гиперновые (HN), но они производят скандий на порядок меньше, чем наблюдается в галактическом веществе. Анализ наблюдательных данных о содержании Sc у звезд в широком диапазоне металличности помогает проверить предположения, заложенные в модели, и установить ограничения на параметры модели. В литературе есть определения содержания Sc у обширных выборок звезд с очень низким содержанием Fe ($[\text{Fe}/\text{H}] < -2$), например, в работах Кэрель и др.

* Электронный адрес: lima@inasan.ru

** Электронный адрес: annarom@inasan.ru

¹ Для любых двух элементов X и Y: $[X/Y] = \lg(N_X/N_Y)_{\text{star}} - \lg(N_X/N_Y)_{\text{Sun}}$.

(2004), Ёнг и др. (2013), Роедерер и др. (2014), но очень мало данных для звезд с $[\text{Fe}/\text{H}] > -2$. Жао и др. (2016) получили содержание Sc для 49 звезд-карликов в диапазоне $-2.6 \leq [\text{Fe}/\text{H}] \leq 0.25$ и Реггиани и др. (2017) — для 23 звезд с $[\text{Fe}/\text{H}]$ между -2.8 и -1.5 .

В настоящей работе рассматриваются две из этих проблем, а именно, касающиеся Солнца и Галактического тренда $[\text{Sc}/\text{Fe}] - [\text{Fe}/\text{H}]$. Проблеме скандия у нормальных A звезд и Am звезд будет посвящена наша следующая статья. Мы определяем содержание по линиям Sc II в солнечном спектре с использованием современных атомных данных и подхода к моделированию спектральных линий о локального термодинамического равновесия (ЛТР). Для краткости будем называть его не-ЛТР подходом. Было бы важно найти ответ на вопрос, является ли солнечное атмосферное содержание Sc космическим, или существуют физические процессы, которые изменяют содержание Sc у Солнца по сравнению с метеоритным.

Мы переопределяем содержание Sc у выборки звезд из работы Жао и др. (2016), используя новую модель атома скандия и отказываясь от дифференциального подхода. Жао и др. (2016) определяли $[\text{Sc}/\text{H}] = \log \varepsilon_{\text{star}} - \log \varepsilon_{\text{sun}}$ для каждой отдельной линии для того, чтобы исключить влияние ошибок в силах осцилляторов (или gf -величин) на конечный результат. Это был вынужденный подход из-за отсутствия точных атомных параметров линий, он исключил из анализа линии Sc II в диапазоне 4246–4420 Å из-за сильных эффектов блендирования в солнечном спектре. Но именно эти линии наиболее надежно измеряются у звезд с $[\text{Fe}/\text{H}] < -2$. В результате для звезд с большим дефицитом металлов Жао и др. (2016) смогли использовать всего лишь от двух до трех линий, а для двух звезд содержание Sc не было получено. В нашей работе использованы лабораторные измерения gf из работы Лоулер и др. (2019), поэтому для каждой звезды содержание определено для всех наблюдаемых линий Sc II. Для улучшения статистики в диапазоне $-1.5 < [\text{Fe}/\text{H}] < -1$ в выборку были добавлены пять звезд из работы Машонкина и др. (2003).

Для решения поставленных задач была построена модель атома скандия с использованием вероятностей переходов из работы Лоулер и др. (2019) и скоростей столкновений с электронами из работы Гриве и Рамсботтом (2012). Ранее не-ЛТР метод анализа линий Sc I–Sc II был разработан Жанг и др. (2008) и применен Жао и др. (2016) для определения не-ЛТР содержания Sc.

Статья построена следующим образом. Новая модель атома представлена в разделе 2. Она тестируется в разделе 3 путем анализа линий Sc II в спектрах звезд с надежно определенными параметрами атмосфер — Солнца, HD 61421 (Процион) и HD 84937. В разделе 4 мы определяем ЛТР и не-ЛТР содержание Sc у звезд выборки и анализируем полученную зависимость $[\text{Sc}/\text{Fe}] - [\text{Fe}/\text{H}]$. Заключение суммирует наши выводы и рекомендации.

2. НОВАЯ МОДЕЛЬ АТОМА СКАНДИЯ

2.1. Атомные данные

Энергии уровней. Модель атома включает три нижних терма Sc I, 888 уровней энергии Sc II и основное состояние Sc III. Энергии уровней взяты из базы экспериментальных данных NIST² (Крамиды и др., 2019) и расчетов атомной структуры Куруц (2009)³. С энергией ионизации $\chi = 6.54$ эВ скандий сильно ионизован в атмосферах звезд с эффективной температурой $T_{\text{eff}} > 4500$ К, причем концентрация Sc I очень сильно зависит от точности расчетов скоростей ионизации и рекомбинации. В отсутствие точных сечений фотоионизации и столкновительных процессов мы исключаем возможность аккуратного расчета статистического равновесия (CP) Sc I. Для уравнивания сохранения числа частиц достаточно иметь три наиболее населенных нижних терма Sc I.

Для основного состояния Sc II $3d4s^3D$ и низковозбужденного терма $3d^2^3F$ учтено тонкое расщепление. Высоковозбужденные уровни Sc II с малым разделением по энергии и одинаковой четности были объединены. Такие суперуровни образованы из уровней, предсказанных в расчетах атомной структуры Sc II, но не обнаруженных (пока) в лабораторных измерениях. Средняя энергия объединенного суперуровня вычислялась с учетом статистических весов отдельных уровней. Окончательная модель атома включает 79 четных и 55 нечетных уровней Sc II. Энергии возбуждения самых верхних уровней Sc II меньше энергии ионизации первых ионов на 0.08–0.26 эВ, что намного меньше средней кинетической энергии электронов при температурах вплоть до 20 000 К. Это обеспечивает эффективную связь уровней Sc II с основным состоянием Sc III посредством столкновений. Диаграмма термов представлена на рис. 1.

Радиативные скорости. Модель атома включает 4032 разрешенных связанно-связанных (b-b) перехода; gf -величины взяты из Лоулер и др. (2019) и Куруц (2009). Для переходов

²<https://www.nist.gov/pml/atomic-spectra-database>

³<http://kurucz.harvard.edu/atoms/2101/>

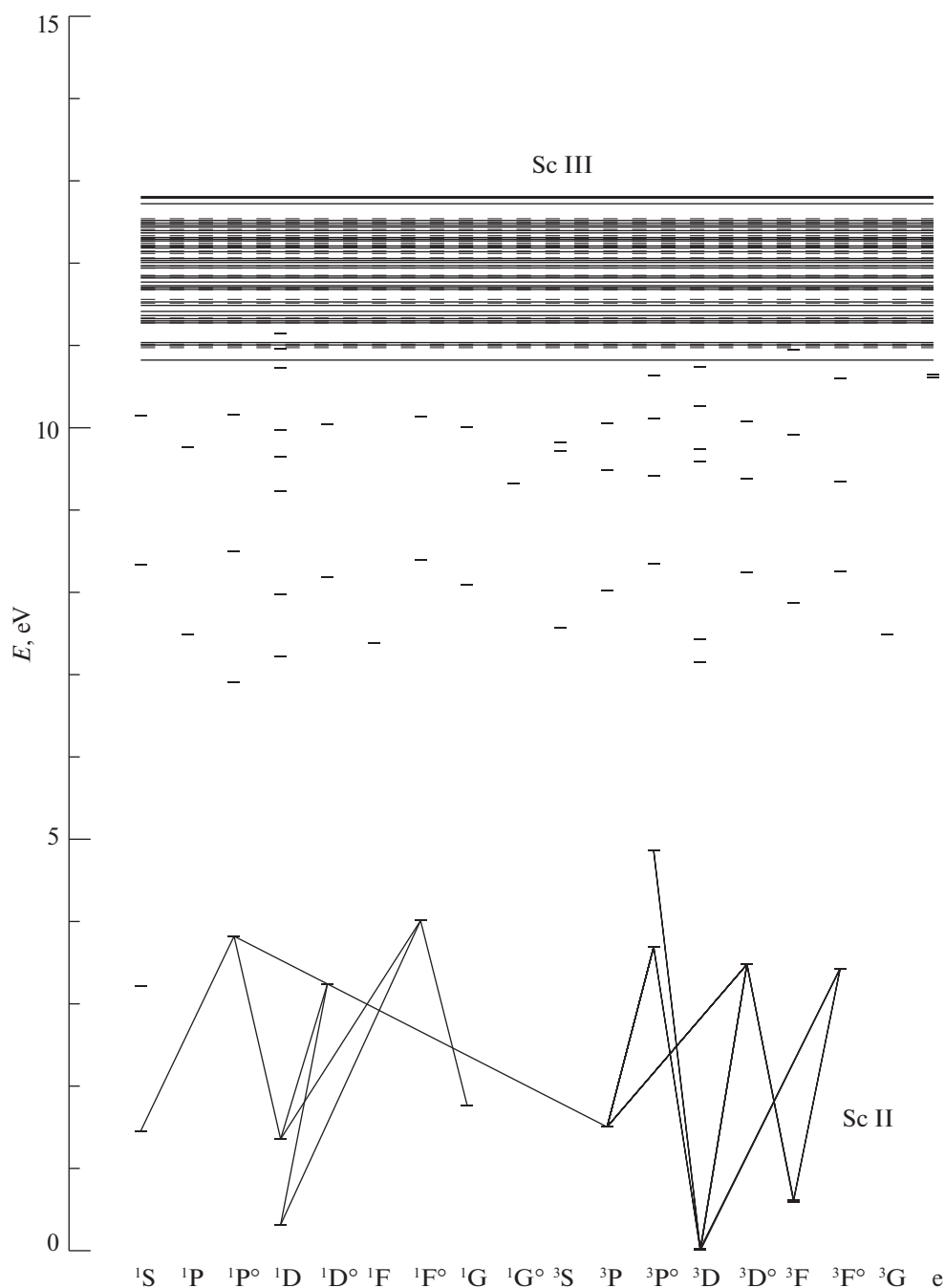


Рис. 1. Уровни Sc II, включенные в модель атома, и переходы, в которых образуются линии, использованные при определении содержания скандия в звездах. Сплошные и штриховые горизонтальные линии указывают энергию четных и нечетных суперуровней соответственно. Уровни с нарушением LS-связи представлены в колонке 'e'.

Sc II, которые связаны с низковозбужденными уровнями и в которых может происходить накачка верхних уровней ультрафиолетовым (УФ) излучением, радиативные скорости вычисляются с фойгтовским профилем поглощения (всего, для 21 перехода). Для остальных переходов профиль поглощения доплеровский. Сечения фотоионизации рассчитываются в водородоподобном приближении с использованием эффективного главного

квантового числа вместо главного квантового числа. Заметим, что концентрация Sc II практически не зависит от точности расчетов скоростей ионизации/рекомбинации, поскольку Sc II — это доминирующая стадия ионизации в атмосферах исследуемых объектов.

Столкновительные скорости. В атмосферах звезд поздних спектральных типов концентрация

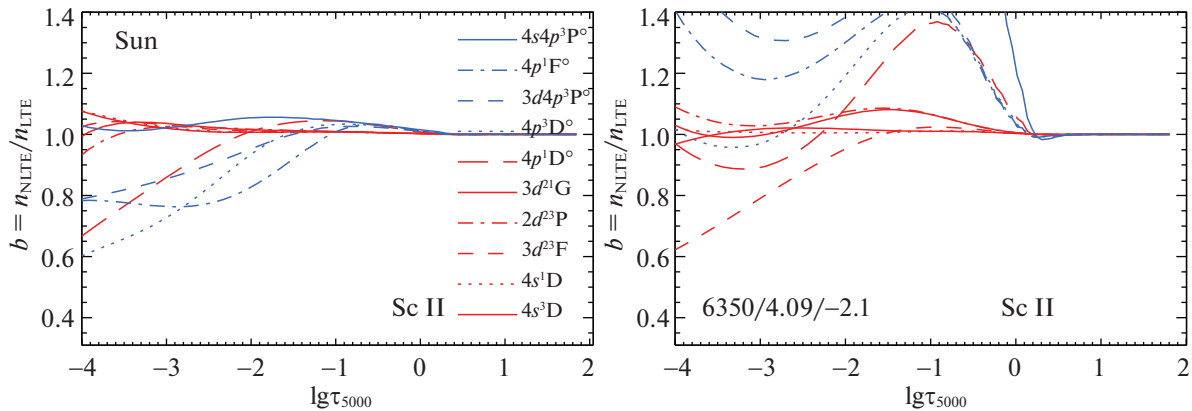


Рис. 2. b -факторы избранных уровней Sc II в моделях атмосфер 5780/4.44/0 и 6350/4.09/-2.1.

электронов намного меньше концентрации нейтральных атомов водорода, поэтому возбуждение уровней и образование ионов могут происходить в результате столкновений не только с электронами, но и с атомами H I. Для возбуждения электронным ударом мы используем данные Гриве и Рамсботтом (2012), полученные методом R-matrix. Они имеются для 948 b-b переходов Sc II между уровнями с энергией возбуждения $E_{\text{exc}} \leq 9.5$ эВ. Заметим, что все наблюдаемые линии Sc II образуются между уровнями именно в этом интервале энергий. Для оставшихся b-b переходов скорости столкновений с электронами рассчитываются по формуле ван Регемортера (1962), если переход разрешенный, и эффективная сила столкновений принимается равной 1, если переход запрещенный. Скорости ионизации электронным ударом вычисляются по формуле Ситон (1962) с использованием принятых пороговых сечений фотоионизации.

Для учета столкновений с H I, приводящих к возбуждению уровней и ионизации Sc I и Sc II, мы используем формулу Стинбок и Холвегер (1984). Так как формула приближенная, с точностью лишь по порядку величины, то расчеты сделаны с несколькими значениями масштабирующего коэффициента $S_{\text{H}} = 0, 0.1$ и 1.

2.2. Статистическое равновесие Sc II в атмосферах звезд разной металличности

Система уравнений статистического равновесия и переноса излучения в заданной модели атмосферы решается по программе DETAIL, разработанной Гиддингс (1981) и Батлер (1984) на основе метода ускоренной Λ -итерации (Райбики, Хаммер, 1991, 1992). Пакет расчета непрозрачности был модифицирован Т. Гереном, Й. Ритцем, Л. Машонкиной, как описано в статье Машонкиной и др. (2011).

Всюду в этой работе мы используем плоско-параллельные (1D) модели атмосфер из базы данных MARCS⁴ (Густафссон и др., 2008). Для заданных T_{eff} , поверхностного ускорения силы тяжести $\log g$ и $[\text{Fe}/\text{H}]$ модели получались путем интерполяции с применением алгоритма, размещенного на сайте MARCS.

На рис. 2 представлены b -факторы ($b = n_{\text{NLTE}}/n_{\text{LTE}}$) отдельных уровней Sc II (при переходах между которыми образуются наблюдаемые линии Sc II), в моделях атмосфер с солнечным содержанием металлов ($T_{\text{eff}}/\log g/[\text{Fe}/\text{H}] = 5780/4.44/0$) и с большим дефицитом металлов (6350/4.09/-2.1). Здесь n_{NLTE} и n_{LTE} — населенности уровня, полученные путем решения уравнений CP (не-ЛТР) и по формулам Больцмана-Саха (ЛТР). Поскольку в обеих моделях Sc II — доминирующая стадия ионизации, то населенности его основного состояния $3d4s^3D$ и первого возбужденного уровня $3d4s^1D$ ($E_{\text{exc}} = 0.3$ эВ) близки к равновесным ($b \simeq 1$) всюду в атмосфере. Так как интенсивность УФ-излучения выше в более горячей и бедной металлами атмосфере, то в ней более эффективна радиативная накачка нечетных термов $3d4p^3F^o$, $3d4p^3P^o$ и $4s4p^3P^o$ в переходах из основного состояния (линии 3613–3642 Å, 3361–3372 Å и 2552–2563 Å). Поэтому поведение всех уровней выше $E_{\text{exc}} = 0.3$ эВ отличается в двух моделях. В модели 6350/4.09/-2.1 уже в глубоких слоях среда становится оптически прозрачной для излучения в линиях, образующихся в спонтанных переходах с перезаселенных ($b > 1$) нечетных термов на низковозбужденные уровни, что делает населенности последних тоже выше равновесных, хотя и в меньшей степени, чем у верхних уровней. Примером является переход $3d^2^3P - 3d4p^3P^o$, в котором образуется линия 5641 Å.

⁴<http://marcs.astro.uu.se>

Таблица 1. Атомные параметры линий Sc II и ЛТР и не-ЛТР ($S_H = 0.1$) содержание скандия $\log \varepsilon$ у эталонных звезд

$\lambda, \text{\AA}$	$E_{\text{exc}}, \text{эВ}$	$\log gf$	Солнце 5780/4.44/0		Процион 6615/3.89/-0.01		HD 84937 6350/4.09/-2.16	
			ЛТР	не-ЛТР	ЛТР	не-ЛТР	ЛТР	не-ЛТР
2552.35 ¹	0.022	0.05	—	—	—	—	0.99	1.23
2563.19	0.000	-0.57	—	—	—	—	0.98	1.15
3353.72	0.315	0.26	—	—	—	—	1.03	1.13
3359.68	0.008	-0.75	—	—	—	—	1.09	1.16
3368.94	0.008	-0.39	—	—	—	—	1.09	1.18
3567.70	0.000	-0.47	—	—	—	—	1.07	1.15
3576.34	0.008	0.01	—	—	—	—	1.01	1.10
3580.92	0.000	-0.14	—	—	—	—	1.07	1.16
3589.63	0.008	-0.57	—	—	—	—	1.10	1.17
3590.47	0.022	-0.55	—	—	—	—	1.11	1.17
3613.83	0.022	0.42	—	—	—	—	1.07	1.11
3642.78	0.000	0.05	—	—	—	—	1.05	1.13
3645.31	0.022	-0.41	—	—	—	—	1.13	1.18
4246.82	0.315	0.24	—	—	—	—	1.14	1.22
4314.08	0.618	-0.11	3.22	3.15	3.17	3.05	1.15	1.27
4320.73	0.605	-0.28	—	—	—	—	1.16	1.27
4325.00	0.595	-0.44	—	—	—	—	1.14	1.25
4400.38	0.605	-0.54	3.18	3.16	3.13	3.07	1.17	1.26
4420.66	0.618	-2.33	3.18	3.18	3.08	3.07	—	—
4670.40	1.357	-0.60	3.14	3.11	3.12	3.08	1.11	1.20
5031.02	1.357	-0.41	—	—	—	—	1.16	1.26
5239.81	1.455	-0.76	3.13	3.13	3.08	3.09	—	—
5357.20 ^{1,2}	1.500	-2.11	3.15	3.15	3.04	3.06	—	—
5526.77	1.768	-0.01	3.24	3.16	3.21	3.09	1.17	1.29
5640.99	1.500	-0.99	3.14	3.13	3.08	3.06	—	—
5657.88	1.507	-0.54	3.20	3.18	3.14	3.09	1.08	1.24
5658.35	1.497	-1.17	3.15	3.15	—	—	—	—
5669.04	1.500	-1.10	3.11	3.11	—	—	—	—
5684.19	1.507	-1.03	3.15	3.14	3.09	3.07	—	—
6245.62 ³	1.500	-1.02	3.04	3.03	3.01	2.99	—	—
6279.74	1.500	-1.33	3.14	3.13	—	—	—	—
6300.68 ³	1.510	-1.90	2.99	3.00	3.04	3.02	—	—
6320.83 ³	1.500	-1.82	3.06	3.05	3.04	3.03	—	—
6604.58	1.357	-1.26	3.08	3.09	2.99	3.00	—	—
Среднее			3.14	3.12	3.09	3.06	1.09	1.19
$\sigma(\text{dex})$			0.06	0.05	0.06	0.03	0.06	0.06

¹ Без учета HFS; ² gf (Лоулер, Дакин, 1989); ³ gf (Куруц, 2009).

3. АНАЛИЗ ЛИНИЙ Sc II В СПЕКТРАХ СОЛНЦА, ПРОЦИОНА И HD 84937

С целью тестирования новой модели атома мы проанализировали линии Sc II в спектрах трех эталонных звезд, для которых есть спектры высокого разрешения и надежно определены параметры атмосфер. Это Солнце, звезда HD 61421 (Процион, F5 IV-V) с содержанием металлов, близким к солнечному, и звезда HD 84937 с большим дефицитом металлов.

3.1. Наблюдательный материал и параметры атмосферы

Мы анализируем спектр Солнца как звезды, используя атлас Куруца и др. (1984). Спектральное разрешение $R = \lambda/\Delta\lambda \simeq 300\,000$. Как и в наших предыдущих исследованиях, мы используем хорошо известные параметры атмосферы Солнца: $T_{\text{eff}} = 5780$ K, $\log g = 4.44$ и скорость микротурбулентности $\xi_t = 0.9$ км/с.

Спектр Проциона, полученный с $R \simeq 80\,000$, взят из архива UVESPOP (Багнуло и др., 2003). Параметры атмосферы $T_{\text{eff}} = 6615$ K, $\log g = 3.89$, $[\text{Fe}/\text{H}] = -0.05$ и $\xi_t = 2$ км/с определены Рябчиковой и др. (2016) путем автоматической подгонки теоретического спектра к избранным участкам в том же наблюдаемом спектре. Отметим, что $T_{\text{eff}} = 6615$ K согласуется в пределах ошибки определения (89 K) с эффективной температурой, полученной Бояджан и др. (2013) в интервале от 6562 до 6597 K на основе интерферометрических измерений углового диаметра Проциона.

Наблюдаемый спектр ($R \simeq 80\,000$) звезды HD 84937 также взят из архива UVESPOP (Багнуло и др., 2003). Кроме того, мы используем ультрафиолетовый спектр, полученный на космическом телескопе Hubble со спектрографом STIS в диапазоне 1875–3158 Å с разрешением $R \simeq 25\,000$. Эти данные представлены Thomas Ayres на сайте проекта ASTRAL⁵. Параметры атмосферы $T_{\text{eff}} = 6350$ K, $\log g = 4.09$, $[\text{Fe}/\text{H}] = -2.16$ и $\xi_t = 1.7$ км/с были определены Ситновой и др. (2015) с использованием спектроскопических и фотометрических методов и известного расстояния.

3.2. Определение содержания скандия

Список линий Sc II, используемых для определения содержания скандия, вместе с их атомными параметрами приведен в табл. 1. Мы используем силы осцилляторов, основанные на лабораторных

измерениях Лоулер и др. (2019). Исключение — линия Sc II 5357 Å с $\log gf$, измеренным Лоулер и Дакин (1989), и линии Sc II 6245, 6300 и 6320 Å, для которых есть только расчеты Куруц (2009).

Уровни в атомах и ионах скандия подвержены сверхтонкому расщеплению (HyperFine Splitting, HFS), поэтому в расчетах теоретических профилей линий необходимо учитывать их HFS-структуру. Для всех исследуемых линий, кроме Sc II 2552 Å и 5357 Å, длины волн и силы осцилляторов HFS-компонент имеются в обновленной базе данных VALD (Пахомов и др., 2019), а также на странице <https://github.com/vmplacco/linemake>. Отметим полное согласие данных в этих двух источниках. В солнечном спектре линия Sc II 5357 Å имеет эквивалентную ширину $EW \simeq 5$ mÅ, и неучет HFS-структуры не влияет на теоретическую EW и определяемое содержание. Линия Sc II 2552 Å измерена только у HD 84937. Возможно, из-за неучета HFS-структуры она дает содержание, которое на 0.08 dex выше, чем среднее по другим УФ-линиям.

Константы ван-дер-ваальсовского уширения $\log \Gamma_6$ для линий Sc II рассчитаны Куруц (2009) и представлены в базе данных VALD (Рябчикова и др., 2015; Пахомов и др., 2019). Они имеют близкие значения для разных линий и в расчете на 10 000 K составляют от $\log \Gamma_6 = -7.81$ до $\log \Gamma_6 = -7.83$.

Программы и методика определения содержания. Всюду анализ проводился методом синтетического спектра путем автоматической подгонки теоретического профиля линии к наблюдаемому. Эквивалентные ширины линий измерялись в этой же процедуре лишь для целей иллюстрации результатов. Использовались компьютерные программы synthV_NLTE (Цымбал и др., 2019) и BinMag (Кочухов, 2018). Список линий для расчета синтетического спектра заимствован из VALD. Помимо модели атмосферы, микротурбулентной скорости и списка атомных параметров линий, фиксированными параметрами в процедуре согласования теоретического и наблюдаемого спектров были спектральное разрешение и проекция скорости вращения на луч зрения $V \sin i$. Для Солнца и Проциона $V \sin i = 1.8$ и 4 км/с соответственно. Как и в работе Жао и др. (2016), уширение вращением также учитывалось для шести звезд с $V \sin i \geq 6$ км/с: HD 58855 ($V \sin i = 10$ км/с), HD 89744 (9 км/с), HD 92855 (10 км/с), HD 99984 (6 км/с), HD 100563 (10 км/с), HD 106516 (7 км/с). Для остальных исследованных звезд уширение линий вращением не учитывалось, так как оно гораздо меньше уширения макротурбулентными движениями. Скорость макротурбулентности

⁵<http://casa.colorado.edu/~ayres/ASTRAL/>

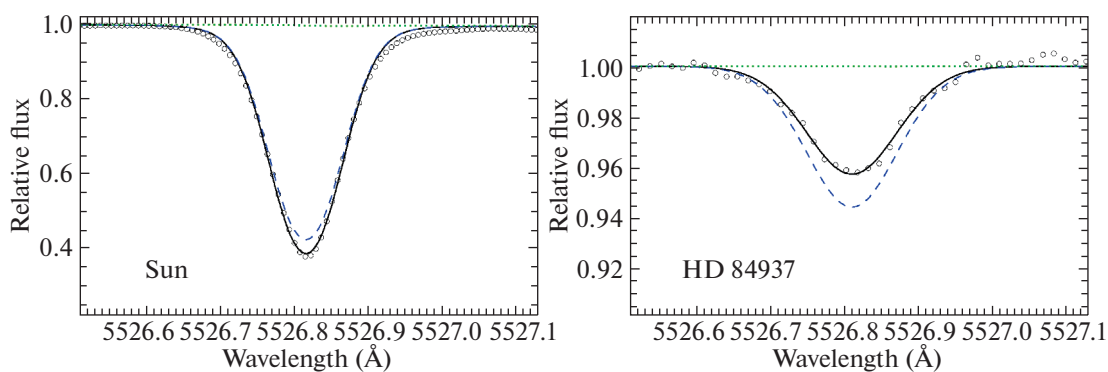


Рис. 3. Линия Sc II 5526 Å в спектрах Солнца и HD 84937 (кружки) и синтетический спектр, описывающий наблюдения наилучшим образом при отказе от ЛТР ($S_H = 0.1$, сплошная кривая). Штриховая кривая соответствует ЛТР расчетам. Для Солнца и HD 84937 расчеты сделаны с $\log \varepsilon = 3.16$ и 1.29 соответственно.

$V_{\text{мас}}$, содержание скандия и смещение линии по длине волны были свободными параметрами в процедуре подгонки. Предварительно было учтено доплеровское смещение линий, обусловленное лучевой скоростью звезды и орбитальным движением Земли вокруг Солнца. Примеры согласования профилей линии Sc II 5526 Å в спектрах Солнца и HD 84937 с не-ЛТР профилями приведены на рис. 3.

Не-ЛТР эффекты в линиях Sc II. Для сравнения на рис. 3 показаны ЛТР профили, рассчитанные с содержанием, полученным в не-ЛТР расчетах. У Солнца отклонения от ЛТР ведут к небольшому усилению линии Sc II 5526 Å, а у HD 84937, наоборот, к ослаблению. Линия Sc II 5526 Å образуется в переходе $3d^2\ ^1G - 3d4p\ ^1F^\circ$. В атмосфере Солнца ее ядро формируется на глубинах с $\log \tau_{5000} \sim -1.6$, где населенность нижнего уровня близка к равновесной, а верхний уровень недонаселен (рис. 2). В результате функция источников в линии меньше функции Планка на этих глубинах, и линия усиливается. Разность между не-ЛТР и ЛТР содержанием ($\Delta_{\text{NLTE}} = \log \varepsilon_{\text{NLTE}} - \log \varepsilon_{\text{LTE}}$), которая называется не-ЛТР поправкой к содержанию, в данном случае составляет -0.08 dex. В атмосфере HD 84937 ядро линии Sc II 5526 Å образуется на глубинах с $\log \tau_{5000} \sim -0.1$, где населенность нижнего уровня близка к равновесной, а верхний уровень перезаселен (рис. 2), что и ведет к ослаблению линии. Не-ЛТР поправка — положительная и равна $\Delta_{\text{NLTE}} = 0.12$ dex.

Результаты определения ЛТР и не-ЛТР содержания по индивидуальным линиям Sc II представлены в табл. 1 и на рис. 4 для каждой из трех эталонных звезд. У Солнца не-ЛТР поправки к содержанию отрицательные и небольшие по абсолютной величине. Исключение — линия Sc II 6604 Å с маленькой положительной поправкой. Процион горячее, и отрицательные не-ЛТР поправки больше

по абсолютной величине. У HD 84937 не-ЛТР эффекты в линиях Sc II сильнее, так как выше интенсивность УФ-излучения и меньше концентрация электронов, а значит больше скорости радиативных переходов и меньше скорости столкновительных процессов. Линии Sc II слабее при не-ЛТР, чем при ЛТР, а Δ_{NLTE} положительные. Для каждой из звезд не-ЛТР ведет к меньшему разбросу содержания по разным линиям и уменьшению среднеквадратичной ошибки $\sigma = \sqrt{\sum(x - \bar{x})^2 / (N_l - 1)}$, где N_l — число линий. Это особенно хорошо видно для Проциона, где σ уменьшается в два раза (до 0.03 dex), и для HD 84937, где не-ЛТР устраняет разницу в содержании между линиями в УФ и видимой областях. Рисунок 5 иллюстрирует надежность определения содержания по линии Sc II 2563 Å в спектре HD 84937. Линия Sc II находится в далеком крыле сильной линии Fe I 2563.399 Å ($E_{\text{exc}} = 0.96$ эВ, $\log gf = -2.26$), которая удовлетворительно описывается при заданных атомных параметрах и содержании железа, и блендирует с линией Cr II 2563.157 Å ($E_{\text{exc}} = 6.805$ эВ, $\log gf = -1.683$), которая намного слабее линии Sc II и из-за неопределенности в содержании хрома (или gf) может повлиять на определяемое содержание скандия не более, чем на 0.01 dex.

Влияние столкновений с атомами водорода. Не-ЛТР расчеты были проведены для трех вариантов столкновительных скоростей в уравнениях CP: $S_H = 0$ — столкновения только с электронами; $S_H = 1$ — включение столкновений с атомами водорода по формуле Стинбук и Холвегер (1984); $S_H = 0.1$ — уменьшение в 10 раз вклада столкновений с H I. Для солнечных линий Sc II не-ЛТР поправки заключены в интервале от +0.01 dex до -0.08 dex в варианте $S_H = 0$ и уменьшаются по абсолютной величине максимум на 0.01 dex в варианте $S_H = 1$. Не-ЛТР эффекты гораздо сильнее для HD 84937 с Δ_{NLTE} от 0.04 dex до 0.24 dex в

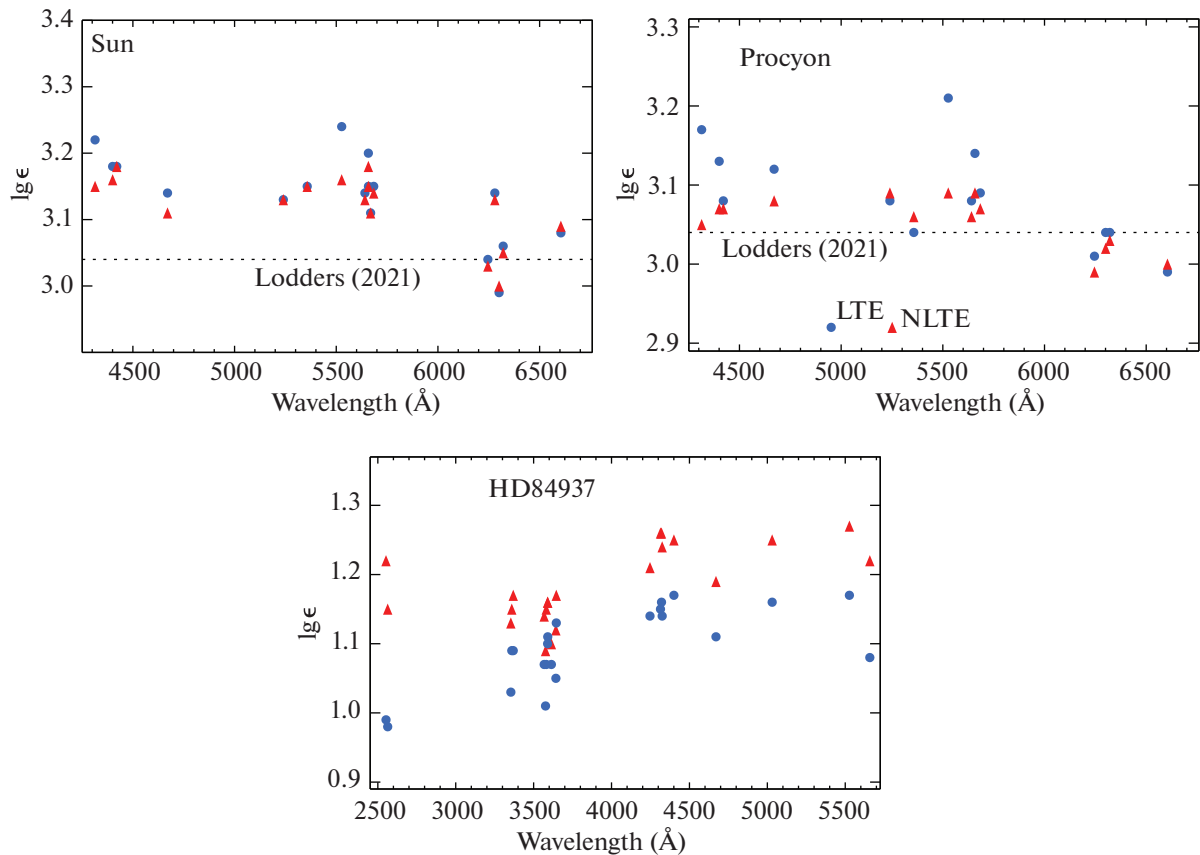


Рис. 4. ЛТР (кружки) и не-ЛТР (треугольники) содержание, полученное по индивидуальным линиям Sc II в спектрах Солнца, Прокцион и HD 84937. Пунктирная линия обозначает метеоритное содержание из работы Лоддерс (2021).

варианте $S_H = 0$, но влияние учета столкновений с H I на конечные результаты мало и для этой звезды: разница в не-ЛТР поправках между вариантами $S_H = 0$ и 1 не превышает 0.02 dex. Слабое влияние учета столкновений с атомами водорода на величину отклонений от ЛТР для линий Sc II обуслов-

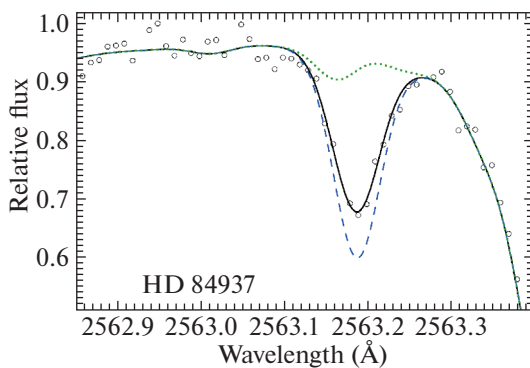


Рис. 5. Линия Sc II 2563 Å в спектре HD 84937 (кружки) и синтетический спектр, описывающий наблюдения наилучшим образом при отказе от ЛТР (сплошная кривая, $\log \epsilon = 1.15$). Штриховая кривая соответствует ЛТР расчетам при том же содержании Sc, а пунктирная кривая — расчетам в отсутствие Sc в атмосфере.

лено структурой термов этого иона и, возможно, отсутствием точных данных о скоростях этих процессов. Формула Стинбук и Холвегер (1084) предназначена только для разрешенных переходов, а у Sc II все уровни с $E_{\text{exc}} < 2$ эВ имеют одинаковую четность. Для разрешенных переходов с энергией более 3 эВ радиативные процессы преобладают над столкновительными. Здесь и далее промежуточный вариант $S_H = 0.1$ был принят для получения окончательного не-ЛТР содержания.

Полученное солнечное не-ЛТР содержание на 0.02 dex меньше, чем ЛТР значение, и ближе к метеоритному содержанию $\log \epsilon_{\text{met}} = 3.04 \pm 0.03$ (Лоддерс, 2021), но все-таки превышает его более, чем на 1σ . А вот у Прокциона не-ЛТР содержание скандия согласуется с метеоритным. Нужно отметить, что в разных работах значение метеоритного содержания варьируется в пределах ошибки определения. Например, ранее Лоддерс и др. (2021) рекомендовали $\log \epsilon_{\text{met}} = 3.07 \pm 0.02$.

3.3. Сравнение с другими авторами

Наше определение среднего солнечного содержания согласуется в пределах ошибки с работами

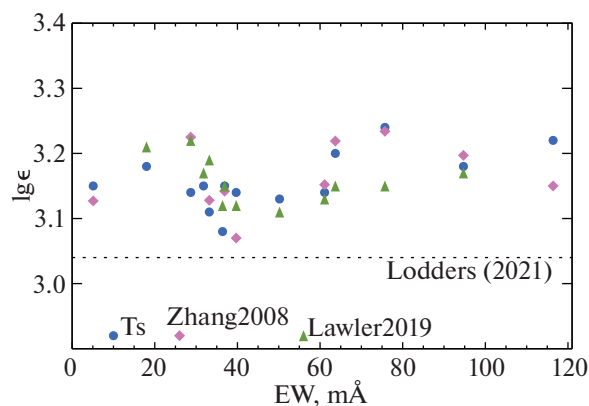


Рис. 6. ЛТР содержание, полученное по индивидуальным линиям Sc II в солнечном спектре разными авторами. Кружки, ромбы и треугольники соответствуют нашей работе (Ts), Жанг и др. (2008) и Лоулер и др. (2019). Данные Жанг и др. (2008) приведены в систему сил осцилляторов Лоулер и др. (2019). Эквивалентные ширины линий — по нашим измерениям. Пунктирная линия обозначает метеоритное содержание из работы Лоддерс (2021).

других авторов, если содержание по индивидуальным линиям привести к одной системе gf -величин. Рисунок 6 показывает ЛТР содержание по индивидуальным линиям из работ Лоулер и др. (2019), Жанг и др. (2008) и нашей. Содержание Жанг и др. (2008) пересчитано с gf -величинами, измеренными Лоулер и др. (2019). Расхождения минимальны между нами и Жанг и др. (2008), так как в обеих работах использованы Атлас Солнца как звезды (Куруц и др., 1984) и теоретические модели атмосфер, хотя и из разных источников — Густафсон и др. (2008) и Групп (2004) соответственно. Среднее содержание различается в этих работах менее, чем на 0.01 dex, но для трех линий (4314, 5640, 5658 Å) разница достигает почти 0.1 dex, что, наиболее вероятно, связано с разным учетом блендирующих линий. Лоулер и др. (2019) использовали спектр Солнца от центра диска (Дельбуй и др., 1973) и полуэмпирическую модель атмосферы (Холвегер, Мюллер, 1974) и получили в среднем более высокое (на 0.02 dex) содержание, чем наше ЛТР значение.

Если рассматривать оригинальные данные, то, используя силы осцилляторов из расчетов Куруца, Жанг и др. (2008) получили $\log \varepsilon(\text{Z08}) = 3.10 \pm 0.05$ и 3.07 ± 0.04 при ЛТР и отказе от ЛТР. Это была первая и до настоящего времени единственная работа по не-ЛТР анализу солнечных линий Sc II. Несмотря на усовершенствованную модель атома, наши расчеты показали близкие не-ЛТР эффекты в линиях Sc II, ввиду их малости.

По линиям Sc II Скотт и др. (2015) определили содержание как $\log \varepsilon(3\text{D}) = 3.17 \pm 0.04$ на основе гидродинамических ЛТР расчетов в трехмерной

(3D) модели солнечной атмосферы и не-ЛТР поправок, опубликованных Жанг и др. (2008). Использовались лабораторные gf -величины из работы Лоулер и Дакин (1989). Скотт и др. (2015) также провели расчеты с классической моделью атмосферы из базы данных MARCS, которая используется и в нашей работе, и получили чуть меньшее значение $\log \varepsilon(1\text{D}) = 3.14$, чем с 3D моделью, но чуть более высокое (на 0.02 dex), чем наше не-ЛТР содержание.

В работе Пеливан Родин и др. (2017) содержание, опубликованное Скотт и др. (2015) для отдельных линий Sc II, было пересчитано с заменой gf -величин на их собственные определения. Полученное среднее $\log \varepsilon(\text{PR17}) = 3.04 \pm 0.13$ согласуется с метеоритным содержанием, но отличается от всех остальных определений большой средне-квадратичной ошибкой, которая полностью обусловлена точностью gf -величин, полученных Пеливан Родин и др. (2017).

Таким образом, с современными атомными данными по силам осцилляторов и сверхтонкой структуре линий Sc II солнечное содержание более, чем на 1σ , превышает метеоритное $\log \varepsilon_{\text{met}} = 3.04 \pm 0.03$ (Лоддерс, 2021), независимо от используемых спектров Солнца (как звезды или от центра диска) и моделей атмосферы (полуэмпирической или теоретической 1D и 3D).

4. ЭВОЛЮЦИЯ СОДЕРЖАНИЯ СКАНДИЯ В ГАЛАКТИКЕ

4.1. Выборка звезд, наблюдательный материал и параметры атмосфер

Основу выборки составляют звезды из наших прежних работ — Ситнова и др. (2015) и Жао и др. (2016), всего 51 звезда в диапазоне $-2.62 \leq [\text{Fe}/\text{H}] \leq 0.24$. В статье Ситновой и др. (2015) приводится вся информация о наблюдениях и описывается редукция спектров. Здесь укажем кратко, что для 47 звезд спектры получены в Ликской обсерватории (США), на 3-м телескопе с эшелле-спектрографом Hamilton; $R \simeq 60\,000$, отношение сигнала к шуму (S/N) на длине волны 5500 Å превышает 100. Спектры HD 84937 и HD 140283 с $R \simeq 80\,000$ взяты из архива UVESPOP (Багнуло и др., 2003). Еще для двух звезд спектры были получены на Канадско-Французско-Гавайском телескопе (CFHT) со спектрографом ESPaDOnS; $R \simeq 60\,000$.

Параметры атмосфер этих звезд заимствованы из статьи Ситновой и др. (2015). Эффективные температуры и ускорение силы тяжести были определены с использованием нескольких методов, в частности, метода инфракрасных потоков,

Таблица 2. ЛТР и не-ЛТР содержание скандия у исследуемых звезд

HD/BD	T_{eff} (K)/ $\log g$ /[Fe/H]/ ξ_t (км/с)	N_t	$\log \varepsilon$		[Sc/Fe]
			ЛТР	не-ЛТР	не-ЛТР
Звезды из работы Ситнова и др. (2015)					
19373	6045/4.24/0.10/1.2	15	3.33 (0.11)	3.30 (0.12)	0.08
22484	6000/4.07/0.01/1.1	13	3.23 (0.12)	3.19 (0.09)	0.06
22879	5800/4.29/-0.84/1.0	10	2.49 (0.03)	2.50 (0.03)	0.22
24289	5980/3.71/-1.94/1.1	11	1.18 (0.06)	1.28 (0.05)	0.10
30562	5900/4.08/0.17/1.3	14	3.34 (0.09)	3.30 (0.08)	0.01
30743	6450/4.20/-0.44/1.8	12	2.83 (0.11)	2.80 (0.11)	0.12
34411	5850/4.23/0.01/1.2	15	3.23 (0.09)	3.21 (0.09)	0.08
43318	6250/3.92/-0.19/1.7	13	3.06 (0.10)	3.03 (0.11)	0.10
45067	5960/3.94/-0.16/1.5	12	3.06 (0.11)	3.02 (0.11)	0.06
45205	5790/4.08/-0.87/1.1	16	2.55 (0.06)	2.54 (0.05)	0.29
49933	6600/4.15/-0.47/1.7	12	2.79 (0.12)	2.77 (0.10)	0.12
52711	5900/4.33/-0.21/1.2	11	3.04 (0.07)	3.02 (0.06)	0.11
58855	6410/4.32/-0.29/1.6	11	3.04 (0.13)	3.01 (0.11)	0.18
59374	5850/4.38/-0.88/1.2	10	2.49 (0.03)	2.52 (0.03)	0.28
59984	5930/4.02/-0.69/1.4	11	2.72 (0.11)	2.72 (0.09)	0.29
62301	5840/4.09/-0.70/1.3	17	2.59 (0.05)	2.57 (0.05)	0.15
64090	5400/4.70/-1.73/0.7	9	1.46 (0.07)	1.51 (0.05)	0.12
69897	6240/4.24/-0.25/1.4	10	2.96 (0.09)	2.95 (0.09)	0.08
74000	6225/4.13/-1.97/1.3	8	1.21 (0.05)	1.32 (0.04)	0.17
76932	5870/4.10/-0.98/1.3	15	2.39 (0.04)	2.40 (0.05)	0.26
82943	5970/4.37/0.19/1.2	16	3.33 (0.09)	3.30 (0.10)	-0.01
84937	6350/4.09/-2.16/1.7	22	1.10 (0.06)	1.20 (0.06)	0.24
89744	6280/3.97/0.13/1.7	12	3.38 (0.08)	3.35 (0.09)	0.10
90839	6195/4.38/-0.18/1.4	13	3.02 (0.09)	3.00 (0.09)	0.06
92855	6020/4.36/-0.12/1.3	10	3.11 (0.08)	3.07 (0.06)	0.07
94028	5970/4.33/-1.47/1.3	12	1.78 (0.07)	1.85 (0.06)	0.20
99984	6190/3.72/-0.38/1.8	10	2.89 (0.07)	2.87 (0.07)	0.13
100563	6460/4.32/0.06/1.6	8	3.30 (0.13)	3.25 (0.10)	0.07
102870	6170/4.14/0.11/1.5	13	3.33 (0.08)	3.30 (0.09)	0.07
103095	5130/4.66/-1.26/0.9	9	1.92 (0.06)	1.95 (0.06)	0.09
105755	5800/4.05/-0.73/1.2	13	2.72 (0.08)	2.72 (0.07)	0.33

Таблица 2. Окончание

HD/BD	T_{eff} (K)/ $\log g$ /[Fe/H]/ ξ_t (км/с)	N_l	$\log \varepsilon$		[Sc/Fe]
			ЛТР	не-ЛТР	не-ЛТР
106516	6300/4.44/−0.73/1.5	8	2.62 (0.05)	2.64 (0.06)	0.25
108177	6100/4.22/−1.67/1.1	6	1.53 (0.16)	1.63 (0.16)	0.18
110897	5920/4.41/−0.57/1.2	13	2.78 (0.08)	2.78 (0.09)	0.23
114710	6090/4.47/0.06/1.1	11	3.24 (0.08)	3.22 (0.06)	0.04
115617	5490/4.40/−0.10/1.1	13	3.14 (0.10)	3.13 (0.10)	0.11
134088	5730/4.46/−0.80/1.1	11	2.61 (0.05)	2.62 (0.05)	0.30
134169	5890/4.02/−0.78/1.2	17	2.56 (0.06)	2.55 (0.04)	0.21
138776	5650/4.30/0.24/1.3	14	3.46 (0.10)	3.45 (0.10)	0.09
140283	5780/3.70/−2.46/1.6	9	0.71 (0.06)	0.84 (0.06)	0.18
142091	4810/3.12/−0.07/1.2	12	3.12 (0.13)	3.14 (0.14)	0.09
142373	5830/3.96/−0.54/1.4	13	2.89 (0.10)	2.88 (0.10)	0.30
+7° 4841	6130/4.15/−1.46/1.3	16	1.78 (0.05)	1.85 (0.04)	0.19
+9° 0352	6150/4.25/−2.09/1.3	8	1.15 (0.06)	1.30 (0.06)	0.27
+24° 1676	6210/3.90/−2.44/1.5	7	0.92 (0.07)	1.06 (0.07)	0.38
+29° 2091	5860/4.67/−1.91/0.8	9	1.35 (0.10)	1.46 (0.06)	0.25
+37° 1458	5500/3.70/−1.95/1.0	10	1.26 (0.11)	1.34 (0.06)	0.17
+66° 0268	5300/4.72/−2.06/0.6	8	1.00 (0.09)	1.09 (0.05)	0.03
−4° 3208	6390/4.08/−2.20/1.4	9	1.08 (0.04)	1.19 (0.06)	0.27
−13° 3442	6400/3.95/−2.62/1.4	7	0.81 (0.07)	0.93 (0.07)	0.43
G090-003	6007/3.90/−2.04/1.3	10	1.22 (0.10)	1.32 (0.09)	0.24
Звезды из работы Машонкина и др. (2003)					
31128	5980/4.42/−1.53/1.2	8	1.74 (0.04)	1.81 (0.05)	0.22
97320	6110/4.26/−1.18/1.4	8	2.20 (0.05)	2.23 (0.06)	0.29
102200	6115/4.29/−1.19/1.4	8	2.01 (0.03)	2.04 (0.05)	0.11
193901	5780/4.46/−1.08/0.9	6	2.14 (0.06)	2.18 (0.06)	0.14
298986	6130/4.26/−1.36/1.4	8	1.87 (0.06)	1.92 (0.05)	0.16

Примечание. Числа в скобках — средне-квадратичные ошибки σ .

с привлечением тригонометрических параллаксов Hipparcos и на основе не-ЛТР анализа линий Fe I и Fe II. Последний метод дал также содержание железа [Fe/H] и микротурбулентную скорость. Выборка однородная по температуре и светимости, которые близки к солнечным значениям: $5400 \text{ K} \leq T_{\text{eff}} \leq 6600 \text{ K}$ и $3.70 \leq \log g \leq 4.72$. Исключение — холодный гигант HD 142091 с $T_{\text{eff}} = 4810 \text{ K}$

и $\log g = 3.12$, который еще далек от стадии выноса продуктов нуклеосинтеза на поверхность. Список звезд и параметры их атмосфер приведены в табл. 2.

Для улучшения статистики в диапазоне $-1.5 < [\text{Fe}/\text{H}] < -1$ в выборку были добавлены пять звезд из работы Машонкиной и др. (2003). Для четырех звезд спектры были получены в Европей-

ской южной обсерватории на телескопе VLT2 с эшелле-спектрографом UVES; $R \simeq 80\,000$, всюду $S/N > 100$. Спектр HD 193901 получен К. Фурманом в испано-германской обсерватории Калар-Альто (Испания) на 2.2-м телескопе с эшелле-спектрографом FOCES; $R \simeq 60\,000$, $S/N > 100$ на длинах волн больше 4500 \AA .

Для этих пяти звезд эффективные температуры были определены Машонкиной и др. (2003) по крыльям водородных линий $H\alpha$ и $H\beta$. Ускорение силы тяжести переопределено в настоящей работе с использованием параллакс Gaia EDR3 (Гайа коллаборация, 2020). Необходимые для этих расчетов видимая звездная величина, масса и T_{eff} заимствованы из статьи Машонкиной и др. (2003). Все звезды близкие, поэтому их $\log g$ изменился не более, чем на 0.09 dex по сравнению с результатами Машонкиной и др. (2003), основанными на параллаксах Hipparcos. Тем не менее мы переопределили $[\text{Fe}/\text{H}]$ и ξ_t из анализа линий Fe II. Фактически микротурбулентная скорость не изменилась. Эти пять звезд — тоже солнечного типа с T_{eff} в диапазоне от 5780 K до 6130 K и $\log g$ от 4.26 до 4.46. Результаты приведены в табл. 2.

4.2. Содержание скандия и Галактический тренд $[\text{Sc}/\text{Fe}]$

Содержание скандия определялось методом синтетического спектра, как и для эталонных звезд в разделе 3. Результаты приведены в табл. 2. Величины $[\text{Sc}/\text{Fe}]$ рассчитаны с солнечным не-ЛТР содержанием, определенным в этой работе: $\log \varepsilon_{\text{NLTE}} = 3.12$.

Для большинства звезд средне-квадратичная ошибка не-ЛТР содержания чуть меньше или такая же, как в случае ЛТР, и не превышает 0.11 dex. Самый большой разброс содержания по отдельным линиям получился для HD 108177 ($\sigma = 0.16 \text{ dex}$) и HD 142091 ($\sigma = 0.14 \text{ dex}$). У первой звезды с $[\text{Fe}/\text{H}] = -1.67$ мы смогли измерить всего шесть линий из-за отсутствия синей ($\lambda < 4500 \text{ \AA}$) части спектра и слабости всех линий с $\lambda \geq 5669 \text{ \AA}$. Вторая звезда — самая холодная ($T_{\text{eff}} = 4810 \text{ K}$) в выборке, и получившееся низкое содержание по линиям 4314 и 4400 \AA , возможно, обусловлено переоценкой вклада молекулярных линий.

В нашей выборке семь звезд имеют металличность, близкую к солнечной (в пределах $\pm 0.10 \text{ dex}$), и все они показывают небольшой избыток скандия относительно солнечного содержания, со средней величиной $[\text{Sc}/\text{H}] = 0.08$. Похожие результаты были получены в работе Жао и др. (2016), где применялся дифференциальный подход (из содержания, полученного по индивидуальной линии у

данной звезды, вычитается соответствующее солнечное содержание) и не-ЛТР метод Жанг и др. (2008). Для тех же семи звезд они получили среднее $[\text{Sc}/\text{H}] = 0.04$. Таким образом, не только у Солнца, но и у звезд солнечного типа в солнечной окрестности содержание скандия выше, чем метеоритное.

Эволюция отношения $[\text{Sc}/\text{Fe}]$ с изменением $[\text{Fe}/\text{H}]$ показана на рис. 7. В диапазоне $[\text{Fe}/\text{H}] > -1$ отношение $[\text{Sc}/\text{Fe}]$ падает с ростом $[\text{Fe}/\text{H}]$, и это напоминает поведение элементов α -процесса O, Mg, Si, Ca, которые синтезируются в SNeII, и у которых $[\alpha/\text{Fe}]$ падает в том же диапазоне $[\text{Fe}/\text{H}]$, с началом производства Fe в сверхновых типа Ia (SNeIa). При более низком содержании железа у α -элементов наблюдается плато на уровне $[\alpha/\text{Fe}] \simeq 0.3-0.4$ (см. рис. 8 и ссылки в статье Жао и др., 2016). Скандий в этом диапазоне тоже наблюдается в избытке относительно железа, но избыток меньше — на уровне $\sim 0.2 \text{ dex}$, и есть значительные отклонения от этой величины. У двух звезд (BD +24° 1676 и BD -13° 3442) $[\text{Sc}/\text{Fe}] \sim 0.4$, а у BD +66° 0268 $[\text{Sc}/\text{Fe}] \sim 0$.

На второй панели рис. 7 представлены отношения $[\text{Sc}/\text{Ti}]$. Даже с учетом их ошибок есть намек на то, что они монотонно растут от $[\text{Sc}/\text{Ti}] \sim -0.1$ до $[\text{Sc}/\text{Ti}] \sim +0.1$ с ростом $[\text{Fe}/\text{H}]$. Исключением снова являются BD +24° 1676 и BD -13° 3442. Содержание Ti заимствовано из работ Жао и др. (2016) для 51 звезды и Ситнова и др. (2022) для пяти дополнительных звезд.

Происхождение Sc плохо изучено, и существующие модели нуклеосинтеза страдают слишком низким производством этого элемента (Кобаяши и др., 2020). Мы не наносим предсказания модели химической эволюции Галактики на рис. 7, так как кривая прошла бы намного ниже наблюдаемых точек, а именно: $[\text{Sc}/\text{Fe}] = -1.15, -0.8$ и -0.9 на значениях $[\text{Fe}/\text{H}] = -2.5, -1.0$ и 0.0 , соответственно, согласно модели Кобаяши и др. (2020). Для титана теоретические модели тоже не могут воспроизвести наблюдения, где он ведет себя как α -элемент (например, рис. 8 в статье Жао и др., 2016).

По-видимому, проблему синтеза скандия нужно решать вместе с проблемой синтеза титана. Мы надеемся, что полученное нами содержание Sc в широком диапазоне металличности даст новый импульс идеям о происхождении скандия.

Сравнение с результатами Жао и др. (2016, далее ZMY16). Полученный нами тренд $[\text{Sc}/\text{Fe}]$ — $[\text{Fe}/\text{H}]$ согласуется с данными ZMY16 в диапазоне $[\text{Fe}/\text{H}] > -0.9$, но мы получили более высокое содержание Sc для звезд меньшей металличности.

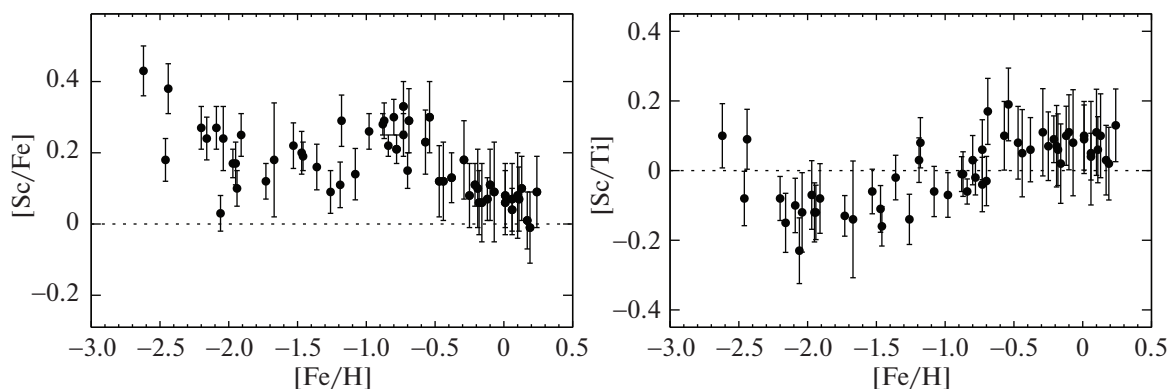


Рис. 7. $[\text{Sc}/\text{Fe}]$ и $[\text{Sc}/\text{Ti}]$ как функция $[\text{Fe}/\text{H}]$ для 56 звезд в солнечной окрестности. Все результаты получены на основе не-ЛТР расчетов.

Например, для HD 84937 $[\text{Sc}/\text{Fe}]_{\text{не-ЛТР}} = 0.24$ у нас, но 0.10 у ZMY16, и это не связано с разной оценкой не-ЛТР эффектов. Разница между не-ЛТР и ЛТР составляет 0.10 dex у нас и 0.12 dex у ZMY16. Наиболее драматичная разница между нашими результатами и ZMY16 получилась для BD $-13^\circ 3442$: $[\text{Sc}/\text{Fe}]_{\text{не-ЛТР}} = 0.43$ и 0.06 соответственно. Разница между не-ЛТР и ЛТР равна 0.12 dex у нас, и она даже больше — 0.16 dex у ZMY16. Мы полагаем, что главная причина расхождений — в списке линий, использованных для определения содержания. Мы анализировали линии Sc II 4246, 4314, 4320, 4400 Å, которые остаются сильными даже у звезд с большим дефицитом металлов, а при дифференциальном подходе, принятом ZMY16, эти линии были исключены, поскольку их невозможно анализировать в солнечном спектре. Линии Sc II в списке ZMY16 — очень слабые у звезд с $[\text{Fe}/\text{H}] < -2$. В результате для BD $-13^\circ 3442$ наше содержание базируется на семи линиях, а ZMY16 использовали три слабые линии.

Наши результаты согласуются с данными Реггиани и др. (2017) в общем диапазоне металличности $-2.6 < [\text{Fe}/\text{H}] < -1.5$. Для 23 звезд Реггиани и др. (2017) получили среднее $[\text{Sc}/\text{Fe}] = 0.31$.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Построена новая модель атома Sc II с использованием современных атомных данных. Из-за отсутствия точных расчетов столкновений Sc II с H I они учитываются по приближенной формуле Стинбук и Холвергер (1984), но наши не-ЛТР расчеты с учетом и без учета такого рода столкновений показали, что их влияние на конечные результаты мало даже для звезд с большим дефицитом металлов. Для HD 84937 ($[\text{Fe}/\text{H}] = -2.16$) разница в полученном содержании Sc

между этими вариантами составляет -0.02 dex (положительные не-ЛТР поправки больше в случае учета только столкновений с электронами).

Разработанный метод был протестирован путем анализа линий Sc II в спектрах эталонных звезд — Солнца, Прокционна и HD 84937. Для каждой звезды учет отклонений от ЛТР уменьшает разброс содержания, определяемого по разным линиям, в том числе по линиям в УФ и в видимом диапазонах у HD 84937, и уменьшает средне-квадратичную ошибку.

Солнечное не-ЛТР содержание скандия $\log \epsilon_{\text{NLTE}} = 3.12 \pm 0.05$ на 0.02 dex меньше, чем в случае ЛТР, и на 0.05 dex и 0.04 dex меньше, чем значения, полученные Скотт и др. (2015) и Лоулер и др. (2019) соответственно. И все-таки оно превышает метеоритное $\log \epsilon_{\text{met}} = 3.04 \pm 0.03$ (Лоддерс, 2021) более чем на 1σ . У Прокционна не-ЛТР содержание скандия согласуется с метеоритным.

Разработанный метод был применен для определения содержания скандия у 56 звезд солнечного типа в широком диапазоне металличности ($-2.62 \leq [\text{Fe}/\text{H}] \leq 0.24$) с использованием спектров высокого разрешения.

У семи звезд с содержанием железа, близким к солнечному ($-0.10 \leq [\text{Fe}/\text{H}] \leq 0.10$), содержание скандия выше не только метеоритного, но и солнечного в среднем на 0.08 dex. Это делает вопрос о том, каким является космическое содержание скандия, еще более актуальным и требующим дальнейших исследований с увеличением статистики звезд и анализа корреляции содержания Sc с различными параметрами звезды, например, ее массой, возрастом и т.д.

В диапазоне $[\text{Fe}/\text{H}] < -1$ скандий наблюдается в избытке относительно железа с $[\text{Sc}/\text{Fe}] \sim 0.2$ dex, хотя для трех звезд нужно отметить значительное отклонение от этой величины. При более высоком

[Fe/H] отношение [Sc/Fe] падает до величины, близкой к солнечной. Такое поведение свидетельствует о синтезе скандия в массивных звездах и напоминает Галактический тренд $[\alpha/\text{Fe}] - [\text{Fe}/\text{H}]$, хотя в области $[\text{Fe}/\text{H}] < -1$ α -элементы имеют более высокие избытки относительно железа.

Наши результаты демонстрируют корреляцию содержания скандия с содержанием титана, происхождение которого, как и скандия, все еще остается неясным. Мы надеемся, что полученное в широком диапазоне металличности содержание скандия даст новый импульс идеям о его (и титана?) происхождении.

Л.И. Машонкина благодарит Министерство науки и высшего образования РФ (грант 13.1902.21.0039) за финансовую поддержку исследования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Адельман и др. (S.J. Adelman, H. Caliskan, D. Kocer, I.H. Cay, and H. Gokmen Tektunali), *MNRAS* **316**, 514 (2000).
- Багнуло и др. (S. Bagnulo, E. Jehin, C. Ledoux, R. Cabanac, C. Melo, R. Gilmozzi, ESO Paranal Science Operations Team), *ESO Messenger* **114**, 10 (2003).
- Батлер (K. Butler), Ph.D. Thesis, University of London (1984).
- Бояджан и др. (T.S. Boyajian, K. von Braun, G. van Belle, Ch. Farrington, G. Schaefer, J. Jones, R. White, H.A. McAlister, T.A. ten Brummelaar, S. Ridgway, D. Gies, L. Sturmann, J. Sturmann, N.H. Turner, P.J. Goldfinger, and N. Vargas), *Astrophys. J.* **771**, 40 (2013).
- Гайя коллаборация (Gaia Collaboration), *VizieR Online Data Catalog: Gaia EDR3 (Gaia Collaboration, 2020)*, I/350 (2020).
- Гиддингс (J. Giddings), Ph.D. Thesis, University of London (1981).
- Гриве и Рамсботтом (M.F.R. Grieve and S.A. Ramsbottom), *MNRAS* **424**, 2461 (2012).
- Групп (F. Grupp), *Astron. Astrophys.* **420**, 289 (2004).
- Густафссон и др. (B. Gustafsson, B. Edvardsson, K. Eriksson, U.G. Jorgensen, A. Nordlund, and B. Plez), *Astron. Astrophys.* **486**, 951 (2008).
- Дельбуй и др. (L. Delbouille, G. Roland, and L. Neven), *Photometric Atlas of the Solar Spectrum from λ 3000 to λ 10000*, (Liège: Inst. d' Ap., Univ. de Liège) (1973).
- Ёнг и др. (D. Yong, J.E. Norris, M.S. Bessell, N. Christlieb, M. Asplund, T.C. Beers, P.S. Barklem, A. Frebel, and S.G. Ryan), *Astrophys. J.* **762**, 26 (2013).
- Жанг и др. (H.W. Zhang, T. Gehren, and G. Zhao), *Astron. Astrophys.* **481**, 489 (2008).
- Жао и др. (G. Zhao, L. Mashonkina, H.L. Yan, S. Alexeeva, C. Kobayashi, Yu. Pakhomov, J.R. Shi, T. Sitnova, K.F. Tan, H.W. Zhang, J.B. Zhang, Z.M. Zhou, M. Bolte, Y.Q. Chen, X. Li, F. Liu, and M. Zhai), *Astrophys. J.* **833**, 225 (2016).
- Кобаяши и др. (C. Kobayashi, A.I. Karakas, and M. Lugaro), *Astrophys. J.* **900**, 179 (2020).
- Кочухов (O. Kochukhov), *Astrophys. Source Code Library, record ascl:1805.015* (2018).
- Крамида и др. (A. Kramida, Y. Ralchenko, J. Reader, NIST ASD Team), *NIST Atomic Spectra Database (version 5.7.1)*. Gaithersburg MD, USA (2019).
- Куруц (R. Kurucz), *Kurucz on-line database of observed and predicted atomic transitions*, <http://kurucz.harvard.edu/atoms/2101/>, (2009).
- Куруц и др. (R.L. Kurucz, I. Furenlid, J. Brault, and L. Testerman), *Solar Flux Atlas from 296 to 1300 nm* *Nat. Solar Obs., Sunspot, New Mexico* (1984).
- Кэрель и др. (R. Cayrel, E. Depagne, M. Spite, V. Hill, F. Spite, P. François, B. Plez, T. Beers, F. Primas, J. Andersen, B. Barbuy, P. Bonifacio, P. Molaro, and B. Nordström), *Astron. Astrophys.* **416**, 1117 (2004).
- Лоддерс и др. (K. Lodders, H. Plame, and H.-P. Gail), *Landolt-Börnstein — Group VI Astronomy and Astrophysics Numerical Data and Functional Relationships in Science and Technology Volume 4B: Solar System*. Ed. J.E. Trümper, 4.4 (2009).
- Лоддерс (K. Lodders), *Space Sci. Rev.* **217**, id.44 (2021).
- Лоулер и Дакин (J.E. Lawler and J.T. Dakin), *J. Opt. Soc. Am. B* **6**, 1457 (1989).
- Лоулер и др. (J.E. Lawler, C. Sneden, G. Nave, M.P. Wood, and J.J. Cowan), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **241**, 21 (2019).
- Машонкина и др. (L. Mashonkina, T. Gehren, C. Travaglio, and T. Borkova), *Astron. Astrophys.* **397**, 275 (2003).
- Машонкина и др. (L. Mashonkina, T. Gehren, J.-R. Shi, et al.), *Astron. Astrophys.* **528**, A87 (2011).
- Пахомов Ю.В., Рябчикова Т.А., Пискунов Н.Е., *Письма в Астрон. Журн.* **63**, 1010 (2019).
- Пеливан Родин и др. (A. Pehlivan Rhodin, M.T. Belmonte, L. Engström, H. Lundberg, H. Nilsson, H. Hartman, J.C. Pickering, C. Clear, P. Quinet, V. Fivet, and P. Palmeri), *MNRAS* **472**, 3337 (2017).
- Райбики и Хаммер (G.B. Rybicki and D.G. Hummer), *Astron. Astrophys.* **245**, 171 (1991).
- Райбики и Хаммер (G.B. Rybicki and D.G. Hummer), *Astron. Astrophys.* **262**, 209 (1992).
- Реггиани и др. (H. Reggiani, J. Meléndez, C. Kobayashi, A. Karakas, and V. Placco), *Astron. Astrophys.* **611**, 74 (2017).
- ван Регемортер (H. van Regemorter), *Astrophys. J.* **136**, 906 (1962).

32. Роедерер и др. (I.U. Roederer, G.W. Preston, I.B. Thompson, S.A. Shectman, C. Sneden, G.S. Burley, and D.D. Kelson), *Astron. J.* **147**, 136 (2014).
33. Рябчикова и др. (T. Ryabchikova, N. Piskunov, R.L. Kurucz, H.C. Stempels, U. Heiter, Y. Pakhomov, and P.S. Barklem), *Phys. Scr.* **90**, 054005 (2015).
34. Рябчикова и др. (T. Ryabchikova, N. Piskunov, Yu. Pakhomov, V. Tsymbal, A. Titarenko, T. Sitnova, S. Alexeeva, L. Fossati, and L. Mashonkina), *MNRAS* **456**, 1221 (2016).
35. Ситнова и др. (T. Sitnova, G. Zhao, L. Mashonkina, Y.Q. Chen, F. Liu, Yu. Pakhomov, K.F. Tan, M. Bolte, S. Alexeeva, F. Grupp, J.R. Shi, and H.W. Zhang), *Astrophys. J.* **808**, 148 (2015).
36. Ситнова и др. (T.M. Sitnova, S.A. Yakovleva, A.K. Belyaev, and L.I. Mashonkina), *MNRAS* **515**, 1510 (2022).
37. Ситон (M.J. Seaton), in *Atomic and Molecular Processes* (New York: Academic Press) (1962).
38. Скотт и др. (P. Scott, M. Asplund, N. Grevesse, M. Bergemann, and A.J. Sauval), *Astron. Astrophys.* **573**, A26 (2015). *Astrophys. J.* **817**, 53 (2016).
39. Стинбук и Холверег (W. Steenbock and H. Holweger), *Astron. Astrophys.* **130**, 319 (1984).
40. Холверег и Мюллер (H. Holweger and E.A. Müller), *Solar Phys.* **39**, 19 (1974).
41. Цымбал и др. (V. Tsymbal, T. Ryabchikova, and T. Sitnova), in Kudryavtsev D.O., Romanyuk I.I., Yakunin I.A., eds, *Astron. Soc. Pacific Conf. Ser.* **518**. *Physics of Magnetic stars*, San Francisco: Astron. Soc. of the Pacific, 247 (2019).