

УДК 524.3-36; 524.74-54

НАБЛЮДАТЕЛЬНЫЕ ОГРАНИЧЕНИЯ НА ИЗМЕНЕНИЯ СОДЕРЖАНИЙ НАТРИЯ И АЛЮМИНИЯ В ПРОЦЕССЕ ЭВОЛЮЦИИ ГАЛАКТИКИ

© 2013 В. С. Менжевицкий*, Н. Н. Шиманская, В. В. Шиманский, Н. А. Сахибуллин

Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, 420008 Россия

Поступила в редакцию 22 апреля 2013 года; принята в печать 10 июня 2013 года

В работе построены и проанализированы единые не-ЛТР распределения содержаний алюминия ($[Al/Fe]-[Fe/H]$) и натрия ($[Na/Fe]-[Fe/H]$) в выборке 160 звезд диска и гало Галактики с металличностью $-4.07 \leq [Fe/H] \leq 0.28$. Значения индексов металличности $[Fe/H]$ и скорости микротурбулентции ξ_{turb} определены по эквивалентным ширинам линий Fe II и Fe I. Определение содержаний натрия и алюминия выполнено с применением 21-уровневой модели атома Na I и 39-уровневой модели атома Al I. Полученные ЛТР распределения $[Na/Fe]-[Fe/H]$ и $[Al/Fe]-[Fe/H]$ не соответствуют теоретическим прогнозам их эволюции, что говорит о необходимости применения не-ЛТР подхода для определения содержания этих элементов. Учет не-ЛТР поправок понижает на 0.05–0.15 dex содержания натрия, определенные по субординатным линиям в звездах диска с $[Fe/H] \geq -2.0$, и на 0.05–0.70 dex с сильной зависимостью от металличности — содержания $[Na/Fe]$, определенные по резонансным линиям в звездах гало с $[Fe/H] \leq -2.0$. Не-ЛТР поправки содержаний алюминия строго положительны и возрастают от 0.0–0.1 dex для звезд тонкого диска ($-0.7 \leq [Fe/H] \leq 0.28$) до 0.03–0.3 dex для звезд толстого диска ($-1.5 \leq [Fe/H] \leq -0.7$) и 0.06–1.2 dex для звезд гало ($[Fe/H] \leq -2.0$). Итоговые не-ЛТР содержания $[Na/Fe]$ показывают разброс индивидуальных значений до $\Delta[Na/Fe] = 0.4$ dex для звезд близкой металличности. Наблюдаемое не-ЛТР распределение $[Na/Fe]-[Fe/H]$ в пределах 0.15 dex совпадает с теоретическими распределениями из работ Самланда и Кобаяши и др. Не-ЛТР содержания алюминия характеризуются слабым разбросом значений (до $\Delta[Al/Fe] = 0.2$ dex) для звезд всех металличностей. Построенное не-ЛТР распределение $[Al/Fe]-[Fe/H]$ имеет удовлетворительное согласие до 0.2 dex с теоретическими данными Кобаяши и др., но сильно (до 0.4 dex) различается с прогнозами Самланда.

Ключевые слова: *звёзды: химический состав—Галактика: эволюция*

1. ВВЕДЕНИЕ

Бурное развитие наблюдательной и теоретической астрофизики звезд во второй половине прошлого века позволило в начале 90-х годов перейти к построению теории химической эволюции. К этому моменту благодаря включению в наблюдения серии крупных и средних телескопов, оснащенных спектрометрами высокого разрешения и электронными приемниками излучения, появился статистически значимый и однородный материал о химическом составе звезд всех компонент Галактики: гало, балджа, толстого и тонкого дисков. Одновременно успехи теоретического моделирования физических условий и ядерных процессов в недрах звезд и формирования межзвездной среды, а также взаимодействия различных галактических

компонент позволили построить одну из первых моделей химической эволюции [1]. Сравнение ее результатов с данными наблюдений показало их качественное согласие для основных химических элементов (Fe, C, O, Si, Ca и др.). Для более корректного согласования в дальнейших работах модель [1] существенно модифицировалась с включением в нее ряда дополнительных явлений: взаимодействия Галактики с окружающими звездными системами, локального перемешивания межзвездной среды, разрывов в процессе звездообразования и др. [2–4]. Одновременно происходил частичный пересмотр интерпретации наблюдательных данных, обусловленный уточнением наборов атомных параметров линий, моделей атмосфер звезд и учетом физических процессов, влияющих на определение содержаний химических элементов. Одним из таких эффектов являются значительные для ряда элементов отклонения от ЛТР.

*E-mail: vt@ksu.ru

Натрий ^{23}Na ($z = 11$) и алюминий ^{27}Al ($z = 13$) являются легкими нечетными элементами третьего ряда периодической системы. Согласно модели [1] и всем последующим исследованиям [2–4], основным механизмом их производства являются реакции гидростатического горения углерода (для Na и Al) и неона (для Al) в ядрах массивных звезд. Дополнительный синтез натрия и алюминия возможен в проходящих одновременно с CNO-циклом реакциях нейтронного захвата атомами неона и магния соответственно [2, 5]. Отметим, что атомы обоих этих элементов способны эффективно поглощать нейтроны в ядрах звезд промежуточных масс, а атомы неона — и в их слоевых источниках. Опубликованные теоретические зависимости содержаний $[\text{Na}/\text{Fe}]$ и $[\text{Al}/\text{Fe}]$ от металличности $[\text{Fe}/\text{H}]$ [2–4, 6] качественно совпадают между собой. Эти зависимости характеризуются дефицитом содержаний $[\text{Na}/\text{Fe}]$ и $[\text{Al}/\text{Fe}]$ в пределах $[\text{X}/\text{Fe}] = (-0.4) - (-0.2)$ в звездах гало $-4.0 \leq [\text{Fe}/\text{H}] \leq -2.0$, умеренным ростом до $[\text{X}/\text{Fe}] = 0.1 - 0.3$ к границам толстого и тонкого дисков при $[\text{Fe}/\text{H}] \approx -0.7$ и медленным уменьшением до $[\text{X}/\text{Fe}] = (-0.2) - (-0.1)$ для звезд с избытком железа. Сравнение теоретических распределений с результатами наблюдений показывало удовлетворительное согласие для звезд тонкого и частично толстого диска при $[\text{Fe}/\text{H}] \geq -1.5$, в которых содержания обоих элементов определены по наборам слабых субординатных линий. Однако на меньших металличностях наблюдался систематический рост избытка наблюдаемого содержания натрия до $\Delta[\text{Na}/\text{Fe}] \approx 0.7$ относительно теоретического с одновременным повышением дефицита алюминия до $\Delta[\text{Al}/\text{Fe}] \approx -0.6$.

Для согласования теории и наблюдений Самланд [2] предложил увеличить эффективность синтеза алюминия в пять раз в реакциях нейтронного захвата атомами магния по сравнению с теорией [1] и ее первой модификацией [7]. В итоге полученное им распределение $[\text{Al}/\text{Fe}] - [\text{Fe}/\text{H}]$ хорошо соответствует наблюдениям на всем диапазоне металличностей. Однако Кобаяши и др. [4] указали на важность учета отклонений от ЛТР в резонансных линиях Na I и Al I, используемых для определения содержаний элементов в звездах гало и балджа.

За последние двадцать лет для атома Na I выполнено много классических исследований физической природы не-ЛТР эффектов [8, 9], амплитуды не-ЛТР поправок содержаний [10, 11] и содержаний натрия в конкретных звездах [12–18]. Брулс и др. [8] показали, что низкое значение сечения фотоионизации с основного состояния $3s$ в сочетании с сильными линиями в оптическом и инфракрасном диапазонах приводит к перенаселению нижних уровней Na I, названному эффектом

“сверхрекомбинации.” Не-ЛТР поправки для широкого набора параметров атмосфер звезд, рассчитанные Машонкиной и др. [9], оказались несущественными ($\Delta_{\text{non-LTE}} = (-0.02) - (-0.11)$ dex) для наиболее слабых линий $\lambda\lambda 6154, 6160 \text{ \AA}$, заметными (до $\Delta_{\text{non-LTE}} = -0.22$ dex) для дублета $\lambda\lambda 5682, 5688 \text{ \AA}$ и очень большими (до $\Delta_{\text{non-LTE}} = -1.0$ dex) для сильных линий $\lambda\lambda 5889, 5895, 8183, 8194 \text{ \AA}$. Применение не-ЛТР расчетов при получении содержаний натрия в больших выборках звезд с $-4.2 \leq [\text{Fe}/\text{H}] \leq 0.4$ [14, 17] позволило удовлетворительно согласовать данные наблюдений с теоретическим прогнозом [2] при значительной дисперсии ($\sigma \approx 0.35$ dex) индивидуальных значений $[\text{Na}/\text{Fe}]$ для звезд с одинаковым $[\text{Fe}/\text{H}]$. Отметим, что в данных работах использованы неоднородные наблюдения разных авторов, полученные с применением фотографических и ПЗС-приемников, а параметры атмосфер звезд определены качественно различными методами. В исследовании Герена и др. [16] относительно небольшого набора звезд с $-2.5 \leq [\text{Fe}/\text{H}] \leq 0.0$, выполненного по однородной методике, найдено аналогичное распределение $[\text{Na}/\text{Fe}] - [\text{Fe}/\text{H}]$ при уменьшении дисперсии до $\sigma \approx 0.15$ dex.

В свою очередь, расчеты статистического равновесия для атома Al I проведены в относительно небольшом числе работ, где рассмотрены причины и характер отклонений от ЛТР [19, 20] и получены оценки не-ЛТР поправок содержаний алюминия в атмосферах звезд разных типов [21, 22] и не-ЛТР содержания элемента в конкретных звездах [16, 23–25]. В отличие от Na I, атом Al I имеет экстремально высокое сечение фотоионизации с основного уровня $3p$ [26, 27], что обуславливает формирование состояния сильной “сверхионизации,” т.е. недонаселенности всех энергетических уровней. Расчеты не-ЛТР поправок [21, 22] для сеток моделей атмосфер показывают их малую амплитуду ($\Delta_{\text{non-LTE}} \leq 0.12$ dex) для субординатных линий $\lambda\lambda 6693, 6698, 7362, 7835, 7836, 8772, 8773 \text{ \AA}$ в спектрах звезд классов F5–M с металличностью $[\text{Fe}/\text{H}] \geq -1.0$. Одновременно резонансный дублет $\lambda\lambda 3944, 3961 \text{ \AA}$, применяемый для определения содержаний алюминия в звездах с $[\text{Fe}/\text{H}] \leq -1.0$, имеет не-ЛТР поправки до $\Delta_{\text{non-LTE}} \approx 1.0$ dex с сильной зависимостью от параметров атмосфер. Статистически значимый набор не-ЛТР содержаний алюминия (35 оценок) в звездах с $-2.5 \leq [\text{Fe}/\text{H}] \leq 0.0$ получен только в работе Герена и др. [16], где найдено качественное согласие наблюдательных данных с теоретическим прогнозом модели [1] при значительной дисперсии ($\sigma \approx 0.4$ dex) индивидуальных значений.

Таким образом, в настоящее время отсутствует детальное сравнение теоретических распределений $[Na/Fe]$ – $[Fe/H]$ и $[Al/Fe]$ – $[Fe/H]$ со статистически значимым набором не-ЛТР содержаний Na и Al, определенных по однородной методике для металличностей $-4.0 \leq [Fe/H] \leq 0.5$. Поэтому в рамках данной работы нами рассчитаны не-ЛТР содержания натрия и алюминия для большой выборки звезд (более 100), наблюдения которых выполнены только с применением ПЗС-приемников и имеют единую шкалу эквивалентных ширин, а параметры атмосфер найдены качественно общей группой методов. В Разделе 2 описаны использованные нами наблюдательные данные, а в Разделе 3 — методы определения параметров атмосфер звезд. Раздел 4 представляет методики моделирования равновесных состояний атомов Na I и Al I с вычислением их не-ЛТР и ЛТР содержаний. В Разделе 5 проведен анализ точности результатов и их сравнение с теоретическими прогнозами. Раздел 6 содержит обсуждение возможных особенностей в эволюции содержаний натрия и алюминия в процессе жизни Галактики и общие выводы нашей работы.

2. НАБЛЮДАТЕЛЬНЫЙ МАТЕРИАЛ

Для достижения высокой однородности получаемых результатов при отборе наблюдательного материала из различных литературных источников учитывалось следующее.

1. Суммарный диапазон металличностей всех рассматриваемых выборок звезд должен охватывать интервал $-4.0 \leq [Fe/H] \leq 0.5$ без разрывов более $\Delta[Fe/H] = 0.5$ dex. Желательно частичное перекрытие диапазонов металличностей звезд, взятых из различных источников.
2. Из выборок исключены все объекты с зарегистрированной физической переменностью или пекулярностью химического состава.
3. Наблюдения звезд выполнены на спектрометрах высокого разрешения с $R > 30\,000$ с использованием ПЗС-приемников.
4. Определение значения эффективной температуры звезд T_{eff} должно быть получено методом инфракрасных потоков или стандартных фотометрических калибровок показателей цвета $V-R$, $V-I$ и JHK -фотометрии, а силы тяжести $\log g$ — с использованием астрометрических параллаксов.
5. Для исследуемых звезд должен быть опубликован полный или частичный набор эквивалентных ширин для не менее 30 линий Fe II, используемых нами при определении индекса металличности $[Fe/H]$ и скорости микротурбулентности ξ_{turb} (см. ниже).

6. В каждом литературном источнике для звезд, включенных наш анализ, должны иметься данные об эквивалентных ширинах линий Na I и Al I.

С учетом перечисленных требований нами для дальнейшего анализа было отобрано шесть литературных источников.

Для 16 звезд-аналогов Солнца, принадлежащих диапазону металличностей $-1.02 \leq [Fe/H] \leq 0.1$, использовались эквивалентные ширины из работы Галеева и др. [28]. Полный набор параметров атмосферы для этих звезд получен ранее Шиманским и др. [29]. Он удовлетворяет описанным выше требованиям, и в настоящей работе принят без изменений. Спектральные наблюдения Галеева и др. [28] проведены с разрешением $R = 45\,000$ с помощью куде-эшелле спектрометров МАЭСТРО 2-м телескопа Zeiss-2000 обсерватории Терскол и SEGGS [30] 1-м телескопа Zeiss-1000 CAO РАН.

Наблюдательные данные для 16 G-карликов с повышенной металличностью $0.04 \leq [Fe/H] \leq 0.26$, взятые из статьи Томкина и др. [31], получены на куде-эшелле спектрографе 2.7-м телескопа Мак-Дональдской обсерватории. Набор параметров атмосферы семи звезд также определен в работе Шиманского и др. [29] и использован в данной работе. Эффективные температуры для двух звезд определены нами по индексам $V-K$ [32] и калибровкам Алонсо и др. [33], а значения силы тяжести на поверхности — по астрометрическим параллаксам спутника Hipparcos [34].

Эквивалентные ширины линий в спектрах девяти поздних K-гигантов с металличностью, близкой к солнечной ($-0.26 \leq [Fe/H] \leq 0.18$), заимствованы из работы Карреры и Панчино [35]. Наблюдения с разрешением $R = 30\,000$ выполнены авторами [35] на эшелле-спектрометре FOCES 2.2-м телескопа обсерватории Калар-Альто (Испания), а эффективные температуры определены ими же [35] по трем показателям цвета $V-R$, $V-I$, $V-K$.

Для 38 F, G-карликов и субгигантов толстого диска Галактики с металличностью $-1.87 \leq [Fe/H] \leq -0.45$ использованы данные спектроскопических наблюдений Джонселл и др. [36], проведенных с разрешением $R \approx 60\,000$ на куде-эшелле спектрометре SEGGS 1.4-м телескопа CAT ESO. Эффективная температура звезд получена авторами из совместного анализа значений, определенных по показателям цвета $V-R$ и стремгеновской фотометрии.

Анализируемые нами наблюдательные данные для выборки из 53 K-гигантов в широком диапазоне металличностей $-1.61 \leq [Fe/H] \leq 0.28$ получены Алвес-Брито и др. [37] с разрешением $R = 45\,000$ – $60\,000$ с помощью спектрографа HIRES 10-м телескопа Keck-1, спектрографа

Таблица 1. Данные по выборкам

| Авторы | Кол-во | T_{eff} , К | $\log g$ | [Fe/H] |
|-------------------------|--------|----------------------|----------|-----------------|
| Галеев и др. [28] | 16 | 5300–6000 | 3.5–4.5 | (–1.02)–(+0.1) |
| Tomkin et al. [31] | 9 | 5800–6300 | 4.0–4.3 | (+0.04)–(+0.26) |
| Carrera et al. [35] | 9 | 4700–5000 | 2.5–3.0 | (–0.26)–(+0.18) |
| Jonsell et al. [36] | 38 | 4900–6100 | 2.7–4.7 | (–1.87)–(–0.45) |
| Alves-Brito et al. [37] | 53 | 4000–5000 | 1.0–3.2 | (–1.61)–(+0.28) |
| Cayrel et al. [38] | 35 | 4500–5300 | 1.0–2.5 | (–4.07)–(–2.06) |

МИКЕ 6.5-м телескопа Магеллан и 2.7-м телескопа обсерватории Мак-Дональд. Значения T_{eff} для всех исследуемых звезд определены авторами [37] методом инфракрасных потоков.

Для 35 К-гигантов и сверхгигантов галактического гало с низкой металличностью $-4.07 \leq [\text{Fe}/\text{H}] \leq -2.06$ нами использованы результаты наблюдений Кэйрела и др. [38], выполненных на спектрографе высокого разрешения ($R = 45\,000$) UVES 8-м телескопа VLT. Значения эффективных температур звезд найдены в [38] из анализа величин, полученных по показателям цвета $V-R$, $V-I$ и JHK -фотометрии.

Общие данные о параметрах звезд исследуемых выборок приведены в Таблице 1.

Таким образом, все использованные нами эквивалентные ширины линий для рассматриваемых 160 звезд измерены в спектрах высокого разрешения, полученных с применением ПЗС-приемников. К сожалению, в исследуемой выборке отсутствуют звезды, одновременно содержащиеся в двух или более литературных источниках. Поэтому можно сделать только косвенные выводы о соответствии систем эквивалентных ширин W_λ линий, взятых из разных работ. Шиманским и др. [29] показано, что системы W_λ из [28] и [31] согласуются в пределах 2%. Томкин и др. [31] показали совпадение до 2 mÅ значений эквивалентных ширин линий с данными Эдвардсона и др. [39], имеющими в свою очередь корреляцию с точностью 3% с результатами Фулбрайта [40]. Система эквивалентных ширин [40] для линий с $W_\lambda \leq 80$ mÅ совпадает в пределах 4% с измерениями Джонселл и др. [36] и в пределах 3% с данными Алвес-Брито и др. [37]. Работы Карреры и Панчино [35] и Кэйрела и др. [38] посвящены исследованию К-гигантов и сверхгигантов с различным [Fe/H], не рассматриваемых в остальных цитируемых статьях. Поэтому проверить соответствие систем W_λ из [35], [38] и других работ оказывается невозможно. В целом, мы пришли к выводу о согласии с точностью

не хуже 5% доступных для сравнения наборов эквивалентных ширин из разных источников, что позволяет использовать их совместно в анализе химической эволюции Галактики.

3. ПАРАМЕТРЫ АТМОСФЕР ЗВЕЗД

Принятые нами по результатам оригинальных работ значения эффективных температур найдены с применением классического метода инфракрасных потоков или стандартных калибровок [33] и данных VRI и JHK -фотометрии. Калибровки [33] построены на основе значений T_{eff} , полученных методом инфракрасных потоков, что делает достаточно однородным набор эффективных температур всех звезд нашей выборки. Величины $\log g$ в перечисленных выше исследованиях установлены с использованием астрометрических параллаксов и также являются однородными. Оценки стандартных ошибок определения параметров атмосфер составляют: $\Delta T_{\text{eff}} = \pm 60$ К, $\Delta \log g = \pm 0.2$ dex для данных [28] и [31], $\Delta T_{\text{eff}} = \pm 75$ К, $\Delta \log g = \pm 0.3$ dex для данных [37], $\Delta T_{\text{eff}} = \pm 85$ К, $\Delta \log g = \pm 0.09$ dex для данных [35], $\Delta T_{\text{eff}} = \pm 80$ К, $\Delta \log g = \pm 0.3$ dex для данных [38]. В результате можно сделать вывод, что ошибки эффективной температуры одинаковы для звезд всех типов и составляют около 80 К, а неопределенность значения поверхностной силы тяжести зависит от расстояния до звезд, возрастая от 0.1 для карликов диска до 0.3 для гигантов и сверхгигантов гало.

Для восстановления единой для всех звезд шкалы металличностей и значений скорости микротурбулентности мы выполнили их переопределение стандартным анализом эквивалентных ширин линий Fe II и Fe I, реализуемым на основе программы WIDTHN. Исключение составили только звезды из работ [28] и [31], для которых аналогичный анализ был ранее выполнен Шиманским и др. [29].

При определении указанных параметров предпочтение отдавалось линиям ионизованного

Таблица 2. Атомные параметры линий Fe I, используемых при определении металличности и микротурбулентной скорости для звезд из выборки [36]

| λ , Å | E_{exc} , eV | $\log g_i f_{ij}$ | k_{γ_6} | λ , Å | E_{exc} , eV | $\log g_i f_{ij}$ | k_{γ_6} |
|------------------|--------------------------|-------------------|----------------|------------------|--------------------------|-------------------|----------------|
| 5679.02 | 4.652 | -0.75 | 5.0 | 6157.73 | 4.076 | -1.25 | 5.0 |
| 5686.53 | 4.548 | -0.67 | 5.0 | 6165.36 | 4.143 | -1.49 | 5.0 |
| 5701.54 | 2.559 | -2.32 | 5.0 | 6170.50 | 4.795 | -0.43 | 5.0 |
| 5705.46 | 4.301 | -1.45 | 5.0 | 6173.34 | 2.223 | -2.94 | 5.0 |
| 5717.83 | 4.284 | -1.08 | 5.0 | 7751.14 | 4.991 | -0.74 | 5.0 |
| 6127.91 | 4.143 | -1.40 | 5.0 | 7780.55 | 4.473 | -0.31 | 5.0 |
| 6136.62 | 2.453 | -1.51 | 2.0 | 7807.95 | 4.991 | -0.56 | 5.0 |
| 6137.69 | 2.588 | -1.51 | 2.0 | 8757.18 | 2.845 | -2.16 | 5.0 |
| 6151.62 | 2.176 | -3.31 | 5.0 | 8763.96 | 4.652 | -0.40 | 5.0 |

* Величины $\log g_i f_{ij}$, k_{γ_6} получены из анализа профилей линий в солнечном спектре.

железа. Таким образом, для звезд из выборок [35], [37], [38] содержание железа и скорость микротурбулентности получены нами по эквивалентным ширинам линий Fe II, и только для звезд из списка [36] — по эквивалентным ширинам линий Fe I. Значения W_λ линий взяты из перечисленных источников.

Список используемых в настоящей работе линий Fe II, их силы осцилляторов f_{ij} и константы ван-дер-ваальсовского уширения C_6 , уточненные на основе анализа потокового атласа Солнца [41], опубликованы в работе [29]. Данные величины в [29] определялись путем согласования теоретического и наблюдаемого профилей линий при фиксированном содержании Fe ($\log \varepsilon_\odot(\text{Fe}) = 7.51$, согласно [42]) на основе модели атмосферы Солнца, полученной интерполированием по сетке ЛТР моделей атмосфер Куруца [43]. При моделировании скорости микротурбулентности для Солнца принималась равной 0.8 км/с. В настоящей работе были выполнены аналогичные расчеты для уточнения атомных параметров спектральных линий нейтрального железа из списка [36]. В Таблице 2 для 18 линий Fe I приведены эмпирически уточненные величины сил осцилляторов и поправочные множители к константе γ_6 (k_{γ_6}).

Отметим, что ошибка определения содержания железа у исследуемых звезд не превышает 0.10 dex, а величины ξ_{turb} — 0.3 км/с.

4. МЕТОДИКА МОДЕЛИРОВАНИЯ

Вычисление не-ЛТР населенностей уровней и эквивалентных ширин линий атомов Na I и Al I выполнялось методом полной линеаризации в версии Ауера и Хисли [44], реализованного в комплексе программ Н. А. Сахибуллина NONLTE3 [45] и модифицированного в более поздних работах [10, 29]. При моделировании переноса излучения в каждой частоте учитывались все источники непрерывного поглощения, 34 основные молекулярные полосы, вычисляемые согласно теории Нерсисян и др. [46], и около 500 000 наиболее сильных линий в диапазоне $\lambda > 912$ Å из списков Куруца [43] с частично уточненным в [47] набором сил осцилляторов в оптическом диапазоне. При вычислении эквивалентных ширин и профилей линий исследуемых атомов Na I и Al I учитывались все механизмы уширения: доплеровское вследствие микротурбулентности и теплового движения, штарковское и ван-дер-ваальсовское, а так же естественное затухание с заданными теоретическими или эмпирическими константами (см. ниже). Все расчеты выполнены с использованием сеток бланкетированных моделей атмосфер Кастелли и Куруца [48] и шкалы солнечных содержаний химических элементов по данным Гревесса и Сейвела [49]. При вычислении не-ЛТР населенностей уровней атомов Na I и Al I содержания данных элементов задавались максимально близкими к средним значениям, полученным по исследуемым линиям.

Не-ЛТР расчеты для Na I проводились с использованием 21-уровневой модели атома, разработанной Машонкиной и др. [9] и существенно улучшенной в [10]. Данная модель включает 20 энергетических уровней Na I с $n \leq 7$, $l \leq 3$ с учетом тонкого расщепления первого возбужденного состояния $3p$ и основной уровень следующей стадии ионизации Na II. В модели учитывается 100 разрешенных связанно-связанных и связанно-свободных переходов, а так же все ударные переходы между уровнями. Как показано в работе [10], наличие остаточного энергетического просвета в $\Delta E \approx 0.27$ эВ между высоколежащими уровнями Na I и континуумом позволяет корректно моделировать не-ЛТР населенности для всех атмосфер с $T_{\text{eff}} \geq 4000$ К.

В данной работе мы использовали эквивалентные ширины двух резонансных $\lambda\lambda 5889, 5895$ Å и четырех субординатных $\lambda\lambda 5682, 5688, 6154, 6160$ Å линий Na I, атомные параметры которых представлены в Таблице 3.

При расчете содержаний натрия в звездах из работы [31] использовались наиболее слабые линии $\lambda\lambda 6154, 6160$ Å, дополненные для работ [35] и [37] линией $\lambda 5688$ Å, а для работ [28] и [36] —

линией $\lambda 5682 \text{ \AA}$. При изучении звезд гало из выборки Кэйрела и др. [38] применялись только линии резонансного дублета $\lambda\lambda 5889, 5895 \text{ \AA}$. Определение дифференциальных содержаний в исследуемых звездах выполнялось путем нормировки на соответствующие солнечные значения, вычисленные по набору эквивалентных ширин линий из статьи Машонкиной и др. [10]. Для проверки соответствия шкал содержаний натрия, построенных по группам резонансных и субординатных линий, нами сделаны тестовые расчеты для семи звезд шарового скопления NGC 2419 с применением параметров атмосфер и наборов эквивалентных ширин линий $\lambda\lambda 5682, 5688, 5889, 5895 \text{ \AA}$ из работы [50]. В результате было установлено, что содержания, определяемые по субординатным линиям $\lambda\lambda 5682, 5688 \text{ \AA}$, превышают значения, полученные по резонансным линиям $\lambda\lambda 5889, 5895 \text{ \AA}$, в среднем на $\Delta\epsilon_{\text{Na}} \approx 0.05 \text{ dex}$ при дисперсии значений внутри обеих групп линий около $\sigma \approx 0.03$. Данный факт может указывать на избыточную примерно на 10% оценку не-ЛТР поправок для резонансных линий в атмосферах бедных металлами звезд. Однако эквивалентные ширины субординатных линий, представленные в [50], имеют низкую точность (ошибки до 50%), что обусловлено их слабостью: на пределе детектируемости. Поэтому мы пришли к выводу о единстве в пределах 0.05 dex шкалы не-ЛТР содержаний Na I, полученной по линиям разных типов.

Не-ЛТР расчеты для Al I проводились с использованием 39-уровневой модели атома, подробно описанной нами ранее [21, 22]. Эта модель включает все уровни атома Al I со значением орбитального квантового числа $l \leq 3$ (т.е. с учетом S, P, D, F -термов) и главного квантового числа $n \leq 12$. Кроме того, в модель включен уровень $3s^2 1S$, соответствующий основному состоянию иона Al II. Возбужденное состояние $3p^2 4P$ Al I не имеет разрешенных переходов на другие уровни атома и для улучшения сходимости и точности расчетов было исключено из моделирования. Энергия ионизации последнего рассматриваемого возбужденного уровня ($12f$) составляет около 0.09 эВ, что позволяет использовать данную модель для анализа содержания Al I в атмосферах звезд с $T_{\text{eff}} > 2000 \text{ K}$.

В данной работе определение содержаний алюминия для исследуемых звезд проводилось с использованием эквивалентных ширин двух резонансных ($\lambda\lambda 3944, 3961 \text{ \AA}$) и семи субординатных ($\lambda\lambda 6693, 6698, 7362, 7835, 7836, 8772, 8773 \text{ \AA}$) линий Al I, атомные параметры которых представлены в Таблице 4.

Таблица 3. Параметры линий Na I: лабораторные длины волн λ , конфигурации переходов, силы осцилляторов f_{ij} , C_6 -константы ван-дер-ваальсовского уширения

| $\lambda, \text{ \AA}$ | Переход | f_{ij} | $\log C_6$ |
|------------------------|---------------------------|----------|------------|
| 5889.97 | $3s^2 S - 3p^2 P_{3/2}^0$ | 0.647 | -31.17 |
| 5895.84 | $3s^2 S - 3p^2 P_{1/2}^0$ | 0.322 | -31.17 |
| 6154.23 | $3p^2 P_{1/2}^0 - 5s^2 S$ | 0.014 | -30.58 |
| 6160.75 | $3p^2 P_{3/2}^0 - 5s^2 S$ | 0.014 | -30.58 |
| 5688.21 | $3p^2 P_{3/2}^0 - 4d^2 D$ | 0.097 | -29.80 |
| 5682.64 | $3p^2 P_{1/2}^0 - 4d^2 D$ | 0.097 | -29.52 |

Таблица 4. Параметры линий Al I: лабораторные длины волн λ , конфигурации переходов, силы осцилляторов f_{ij} , C_6 -константы ван-дер-ваальсовского уширения

| $\lambda, \text{ \AA}$ | Переход | f_{ij} | $\log C_6$ |
|------------------------|-------------------------------------|----------|------------|
| 3944.01 | $3p^2 P_{1/2}^0 - 4s^2 S$ | 0.120 | -31.70 |
| 3961.52 | $3p^2 P_{3/2}^0 - 4s^2 S$ | 0.120 | -31.70 |
| 6696.03 | $4s^2 S - 5p^2 P_{3/2}^0$ | 0.0145 | -28.55 |
| 6698.68 | $4s^2 S - 5p^2 P_{1/2}^0$ | 0.0072 | -28.55 |
| 7362.29 | $3d^2 D_{5/2} - 7f^2 F_{3/2,5/2}^0$ | 0.0300 | -27.59 |
| 7835.32 | $3d^2 D_{3/2} - 6f^2 F_{3/2}^0$ | 0.0495 | -28.32 |
| 7836.13 | $3d^2 D_{5/2} - 6f^2 F_{3/2,5/2}^0$ | 0.0500 | -28.11 |
| 8772.87 | $3d^2 D_{3/2} - 5f^2 F_{3/2}^0$ | 0.105 | -28.70 |
| 8773.90 | $3d^2 D_{5/2} - 5f^2 F_{3/2,5/2}^0$ | 0.099 | -28.70 |

При расчете содержаний алюминия в звездах из работы [36] использовались линии дублета $\lambda\lambda 8772, 8773 \text{ \AA}$, из работы [37] — линии дублета $\lambda\lambda 6696, 6698 \text{ \AA}$. Для работы [28] использовались линии дублетов $\lambda\lambda 6696, 6698 \text{ \AA}$ и $\lambda\lambda 7835, 7836 \text{ \AA}$, а также линия $\lambda 7362 \text{ \AA}$. Для работы [31] использовались все три дублета $\lambda\lambda 6696, 6698 \text{ \AA}$, $\lambda\lambda 7835, 7836 \text{ \AA}$, $\lambda\lambda 8772, 8773 \text{ \AA}$, а для работы [35] — все указанные выше субординатные линии. Для звезд гало (выборка Кэйрела и др. [38]) из-за того, что субординатные линии оказываются очень слабы, для расчета использовались только линии резонансного дублета $\lambda\lambda 3944, 3961 \text{ \AA}$. Определение дифференциальных содержаний в исследуемых звездах выполнялось путем нормировки на соответствующие солнечные значения (см. [21, 22]).

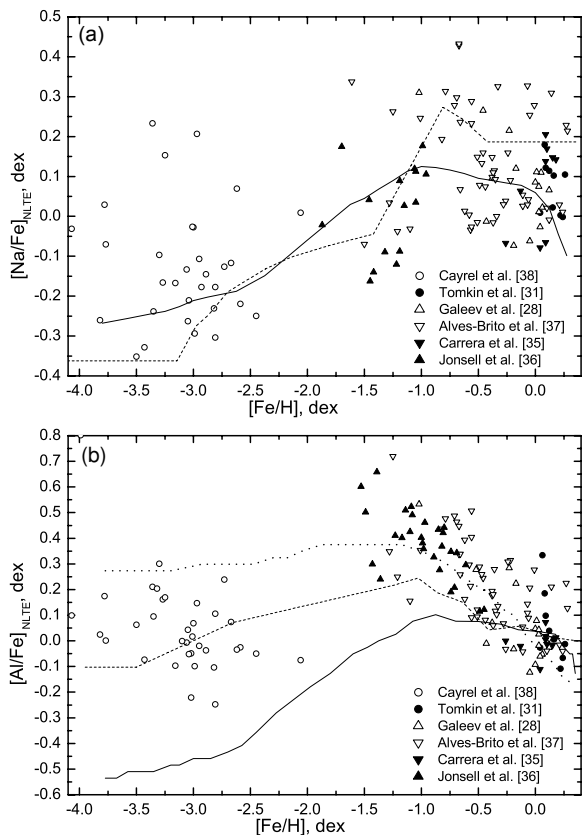


Рис. 1. Изменение содержания Na (a) и Al (b) с изменением металличности для звезд из разных источников. Показаны теоретические зависимости Вусли и Вивера [7] (пунктирная линия), Самланда [2] (сплошная) и Кобаяши и др. [4] (штриховая).

К сожалению, среди всех звезд рассматриваемых выборок нет ни одной звезды, для которой были бы определены эквивалентные ширины и резонансных линий, и каких-либо субординатных линий Al I. Поэтому провести сравнение содержания алюминия, определенных по линиям разных типов, не представилось возможным.

Таблица 5. Влияние изменения параметров модели на итоговое содержание Al и Na

| Параметры атмосферы | $\Delta\epsilon_{\text{Na}}$ | | $\Delta\epsilon_{\text{Al}}$ | |
|--|------------------------------|------------|------------------------------|------------|
| | Dwarfs | Giants | Dwarfs | Giants |
| $T_{\text{eff}} \pm 80 \text{ K}$ | ± 0.05 | ± 0.07 | ± 0.05 | ± 0.08 |
| $\log g \pm 0.3 \text{ dex}$ | ± 0.03 | ± 0.02 | ± 0.05 | ± 0.02 |
| $[\text{Fe}/\text{H}] \pm 0.3 \text{ dex}$ | ± 0.01 | ± 0.01 | ± 0.05 | ± 0.05 |
| $\xi_{\text{turb}} \pm 0.2 \text{ km/c}$ | ± 0.07 | ± 0.07 | ± 0.02 | ± 0.08 |

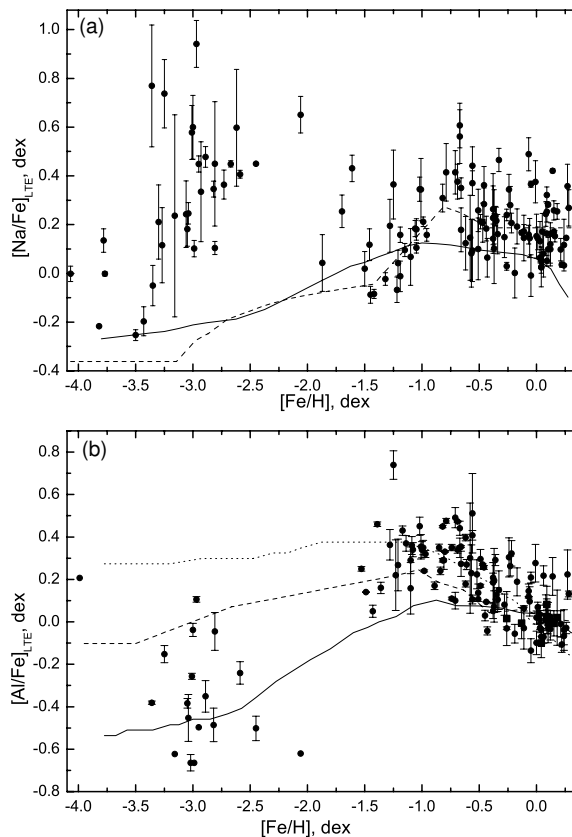


Рис. 2. ЛТР содержания натрия (a) и алюминия (b). Обозначения — как на Рис. 1.

Для оценки возможных неопределенностей не-ЛТР содержаний исследуемых элементов, обусловленных ошибками параметров атмосфер, мы выполнили тестовые расчеты для нескольких звезд разных типов с варьированием $\Delta T_{\text{eff}} = \pm 80 \text{ K}$, $\Delta \log g = \pm 0.3$, $\Delta [\text{Fe}/\text{H}] = \pm 0.3$, $\Delta \xi_{\text{turb}} = \pm 0.2 \text{ km/c}$, результаты которых представлены в Таблице 5.

Результаты расчетов показали, что для натрия даже значительные погрешности в принятом значении поверхностной силы тяжести практически не сказываются на точности определения его содержания. Для сверхгигантов и гигантов с $T_{\text{eff}} \leq 5200 \text{ K}$ влияние ошибок эффективной температуры и скорости микротурбулентности примерно одинаково и составляет $\Delta\epsilon_{\text{Na}} \approx 0.07 \text{ dex}$. Для более горячих карликов и субгигантов солнечной металличности ошибки в скорости микротурбулентности вносят наибольший вклад ($\Delta\epsilon_{\text{Na}} \approx 0.07 \text{ dex}$) в неопределенность содержания натрия. В аналогичных звездах с дефицитом металлов ($[\text{Fe}/\text{H}] \approx -1.0 \text{ dex}$) ошибки

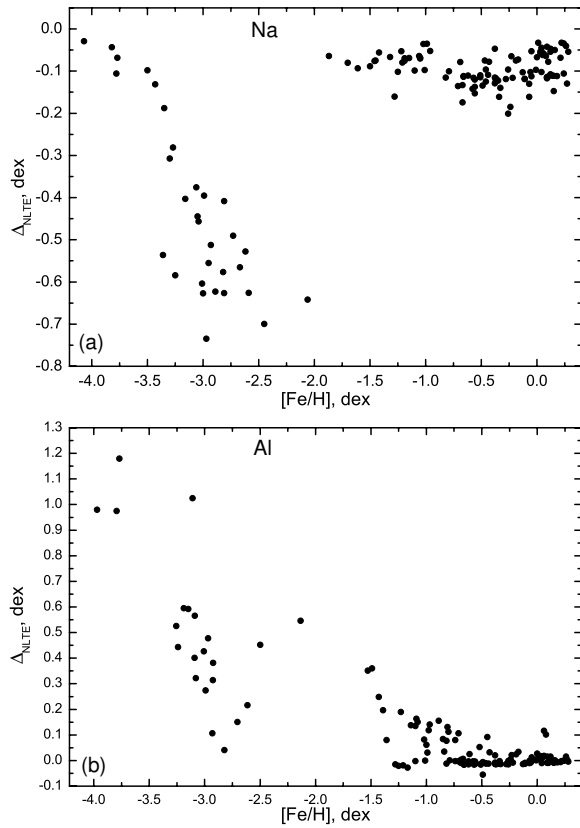


Рис. 3. Величины не-ЛТР поправок к содержанию натрия (а) и алюминия (б).

принятых параметров атмосферы несущественно влияют на содержание исследуемого элемента.

Результаты тестовых расчетов для алюминия показывают, что на точности определения его содержания в атмосферах звезд-карликов в равной степени сказываются ошибки в определении температуры, величины поверхностной силы тяжести и металличности (в пределах $\Delta\epsilon_{\text{Al}} \approx 0.05$). Вклад ошибок скорости микротурбулентности незначителен. Для сверхгигантов и гигантов наибольший вклад в ошибки определения содержания дают ошибки эффективной температуры и скорости микротурбулентности: $\Delta\epsilon_{\text{Al}} \approx 0.05$.

В целом по проведенным расчетам можно сделать вывод, что суммарная ошибка определения содержания натрия и алюминия, обусловленная неточностью определения параметров атмосферы, для звезд карликов из исследуемых выборок не превосходит 0.1 dex, а для гигантов и сверхгигантов — 0.12 dex.

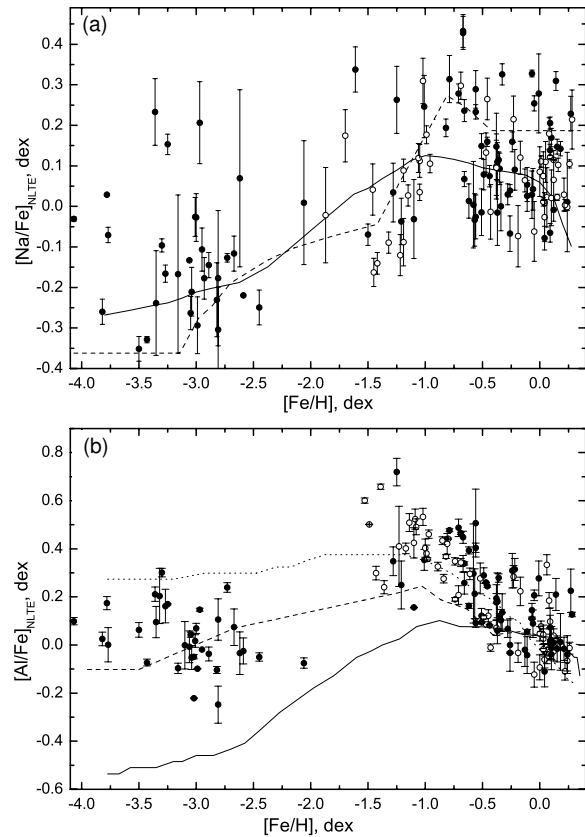


Рис. 4. He-ЛТР содержания натрия (а) и алюминия (б). Обозначения — как на Рис. 1. Открытыми кружками выделены звезды с $\log g > 3.0$, сплошными кружками — звезды с $\log g \leq 3.0$.

5. РЕЗУЛЬТАТЫ

Относительные ЛТР и не-ЛТР содержания натрия и алюминия определялись как:

$$[X/\text{Fe}] = \epsilon_X(\text{Star}) - \epsilon_X(\text{Sun}) - (\epsilon_{\text{Fe}}(\text{Star}) - \epsilon_{\text{Fe}}(\text{Sun})),$$

где $\epsilon_X(\text{Star})$ и $\epsilon_X(\text{Sun})$ — содержания элемента X в атмосфере звезды и Солнца. Зависимости ЛТР и не-ЛТР содержания натрия и алюминия от индекса металличности $[\text{Fe}/\text{H}]$ представлены на Рис. 1, 2, 3 и 4 и в Таблице 6. Как видно на Рис. 1, где результаты показаны отдельно для каждого литературного источника, в диапазоне металличностей $-1.7 \leq [\text{Fe}/\text{H}] \leq 0.3$ имеется частичное перекрытие данных из пяти выборок, что позволяет провести их сравнительный анализ.

Содержания натрия, полученные с использованием данных [28] и [35], показывают хорошую корреляцию результатов на едином графике распределения $[\text{Na}/\text{Fe}]$ – $[\text{Fe}/\text{H}]$ в диапазоне металличностей

Таблица 6. Металличность $[Fe/H]$, скорость микротурбулентности ξ_{turb} (км/с) и не-ЛТР содержания алюминия $[Al/Fe]$ и натрия $[Na/Fe]$ в звездах выборки

| Name | [Fe/H] | ξ_{turb} | [Al/Fe] | [Na/Fe] | Name | [Fe/H] | ξ_{turb} | [Al/Fe] | [Na/Fe] |
|-------------------------|--------|--------------|---------|---------|-----------|--------|--------------|---------|---------|
| Галеев и др. [28] | | | | | | | | | |
| HD 004307 | -0.19 | 0.90 | -0.03 | -0.07 | HD 159222 | 0.12 | 1.10 | -0.03 | 0.07 |
| HD 004915 | -0.38 | 0.80 | 0.07 | 0.10 | HD 186408 | 0.01 | 1.00 | 0.08 | 0.11 |
| HD 006582 | -1.02 | 0.90 | 0.53 | 0.31 | HD 186427 | 0.03 | 0.90 | 0.04 | 0.07 |
| HD 010307 | 0.06 | 0.90 | -0.05 | 0.02 | HD 187923 | -0.17 | 1.00 | 0.22 | 0.12 |
| HD 034411 | 0.03 | 1.00 | 0.03 | 0.11 | HD 197076 | -0.05 | 0.80 | -0.12 | -0.06 |
| HD 133002 | -0.52 | 1.50 | 0.28 | 0.27 | HD 213575 | -0.23 | 1.20 | 0.28 | 0.22 |
| HD 141004 | 0.00 | 0.90 | 0.05 | 0.09 | HD 222143 | 0.04 | 0.80 | -0.06 | -0.03 |
| HD 146233 | 0.03 | 0.80 | -0.02 | 0.01 | HD 225239 | -0.43 | 1.30 | -0.01 | -0.01 |
| Alves-Brito et al. [37] | | | | | | | | | |
| HD 041667 | -1.21 | 1.50 | 0.25 | -0.04 | HD 219615 | -0.66 | 1.50 | 0.34 | 0.24 |
| HD 078050 | -1.10 | 1.60 | 0.16 | -0.03 | HD 221345 | -0.36 | 1.40 | 0.28 | 0.11 |
| HD 114095 | -0.79 | 1.20 | 0.48 | 0.31 | HD 000787 | -0.24 | 1.90 | 0.31 | 0.16 |
| HD 210295 | -1.61 | 1.50 | - | 0.34 | HD 003546 | -0.66 | 1.50 | 0.26 | 0.07 |
| I 012 | -0.62 | 1.90 | 0.39 | 0.01 | HD 005268 | -0.51 | 1.40 | 0.12 | -0.01 |
| HD 077236 | -0.82 | 1.50 | 0.44 | 0.19 | HD 029503 | -0.06 | 1.50 | 0.09 | 0.04 |
| HD 023940 | -0.46 | 1.40 | 0.24 | 0.16 | HD 045415 | -0.11 | 1.51 | 0.06 | 0.05 |
| HD 040409 | 0.10 | 1.10 | -0.04 | 0.02 | HD 050778 | -0.34 | 1.63 | 0.10 | 0.00 |
| HD 083212 | -1.50 | 1.80 | - | -0.07 | HD 073017 | -0.51 | 1.00 | 0.09 | 0.15 |
| HD 099978 | -1.25 | 1.40 | 0.72 | 0.26 | HD 099648 | -0.07 | 1.60 | 0.11 | 0.33 |
| HD 030608 | -0.35 | 1.25 | 0.12 | 0.09 | HD 116976 | 0.14 | 1.50 | 0.21 | 0.31 |
| HD 100920 | -0.11 | 1.30 | -0.04 | 0.03 | HD 117220 | -1.01 | 1.06 | 0.35 | 0.25 |
| HD 115478 | -0.07 | 1.48 | 0.14 | 0.03 | HD 117818 | -0.28 | 1.50 | 0.07 | 0.03 |
| HD 032440 | -0.26 | 1.50 | -0.03 | 0.04 | HD 128188 | -1.28 | 1.14 | 0.35 | 0.03 |
| HD 037763 | 0.21 | 1.10 | -0.02 | 0.03 | HD 132345 | 0.27 | 1.62 | 0.23 | 0.23 |
| HD 077729 | -0.56 | 1.20 | 0.40 | 0.29 | HD 142948 | -0.57 | 1.30 | 0.21 | -0.03 |
| HD 080811 | -0.69 | 1.20 | 0.46 | 0.30 | HD 171496 | -0.56 | 1.40 | 0.09 | -0.03 |
| HD 107328 | -0.38 | 1.50 | 0.18 | 0.10 | HD 172223 | 0.24 | 1.70 | -0.04 | 0.01 |
| HD 107773 | -0.47 | 1.00 | 0.26 | 0.13 | HD 174116 | -0.67 | 1.53 | 0.45 | 0.43 |
| HD 119971 | -0.58 | 1.40 | 0.30 | 0.00 | HD 175219 | -0.37 | 1.45 | 0.06 | 0.11 |
| HD 124897 | -0.71 | 1.70 | 0.49 | 0.28 | HD 186378 | -0.05 | 1.50 | 0.21 | 0.25 |

Таблица 6. (Продолжение)

| Name | [Fe/H] | ξ_{turb} | [Al/Fe] | [Na/Fe] | Name | [Fe/H] | ξ_{turb} | [Al/Fe] | [Na/Fe] |
|--------------------|--------|---------------------|---------|---------|--------------|--------|---------------------|---------|---------|
| HD 127243 | -0.62 | 1.50 | 0.16 | - | HD 187195 | -0.01 | 1.35 | 0.28 | 0.28 |
| HD 130952 | -0.38 | 1.40 | 0.19 | 0.15 | HD 211075 | -0.49 | 1.60 | 0.29 | 0.08 |
| HD 136014 | -0.37 | 1.30 | 0.18 | -0.02 | HD 212320 | -0.33 | 1.70 | 0.14 | 0.33 |
| HD 148451 | -0.67 | 1.40 | 0.34 | 0.43 | HD 214376 | 0.12 | 1.40 | 0.01 | -0.01 |
| HD 180928 | -0.56 | 1.40 | 0.51 | 0.23 | HD 215030 | -0.44 | 1.10 | 0.08 | 0.07 |
| HD 203344 | -0.22 | 1.35 | 0.31 | 0.09 | HD 221148 | 0.28 | 0.85 | 0.13 | 0.21 |
| Tomkin et al. [31] | | | | | | | | | |
| HD 009562 | 0.16 | 1.60 | 0.01 | 0.10 | HD 107213 | 0.06 | 2.10 | 0.33 | 0.02 |
| HD 030562 | 0.09 | 1.55 | 0.10 | 0.12 | HD 199960 | 0.26 | 1.40 | -0.01 | 0.11 |
| HD 067228 | 0.12 | 1.75 | 0.04 | 0.11 | HD 210855 | 0.08 | 2.35 | 0.19 | 0.18 |
| HD 086728 | 0.24 | 1.25 | -0.07 | 0.00 | HD 217014 | 0.22 | 1.25 | -0.11 | 0.00 |
| HD 088986 | 0.04 | 1.50 | -0.03 | 0.01 | | | | | |
| Cayrel et al. [38] | | | | | | | | | |
| HD 002796 | -2.45 | 2.20 | -0.05 | -0.25 | CS 22892-052 | -2.99 | 2.00 | -0.10 | -0.29 |
| HD 122563 | -2.81 | 2.00 | 0.11 | -0.18 | CS 22896-154 | -2.73 | 1.20 | 0.24 | -0.13 |
| HD 186478 | -2.59 | 2.00 | -0.03 | -0.22 | CS 22897-008 | -3.35 | 2.00 | 0.10 | -0.24 |
| BD +17°3248 | -2.06 | 1.80 | -0.08 | 0.01 | CS 22948-066 | -3.06 | 1.90 | -0.01 | -0.13 |
| BD -18°5550 | -3.05 | 1.80 | 0.04 | -0.26 | CS 22949-037 | -3.99 | 1.80 | 0.80 | - |
| CD -38°245 | -4.07 | 2.20 | 0.10 | -0.03 | CS 22952-015 | -3.36 | 2.10 | 0.21 | 0.23 |
| BS 16467-062 | -3.77 | 1.60 | 0.00 | -0.07 | CS 22953-003 | -2.81 | 2.00 | -0.25 | -0.30 |
| BS 16477-003 | -3.27 | 1.80 | 0.16 | -0.17 | CS 22956-050 | -3.32 | 1.80 | 0.20 | - |
| BS 17569-049 | -2.89 | 2.10 | -0.04 | -0.15 | CS 22966-057 | -2.62 | 1.60 | -0.03 | 0.07 |
| CS 22169-035 | -3.02 | 2.10 | -0.22 | - | CS 22968-014 | -3.50 | 1.90 | 0.06 | -0.35 |
| CS 22172-002 | -3.82 | 2.20 | 0.03 | -0.26 | CS 29491-053 | -3.04 | 2.30 | -0.05 | -0.21 |
| CS 22186-025 | -3.02 | 2.10 | -0.05 | -0.18 | CS 29495-041 | -2.82 | 1.90 | -0.10 | -0.23 |
| CS 22189-009 | -3.43 | 1.90 | -0.07 | -0.33 | CS 29502-042 | -3.10 | 1.50 | 0.00 | - |
| CS 22873-055 | -2.97 | 2.20 | 0.15 | 0.21 | CS 29516-024 | -3.01 | 1.50 | 0.02 | -0.03 |
| CS 22873-166 | -3.00 | 2.10 | 0.07 | -0.03 | CS 29518-051 | -2.67 | 1.40 | 0.07 | -0.12 |
| CS 22873-101 | -3.16 | 1.90 | -0.10 | -0.17 | CS 30325-094 | -3.30 | 1.50 | 0.30 | -0.10 |
| CS 22885-096 | -3.78 | 1.80 | 0.17 | 0.03 | CS 31082-001 | -2.95 | 1.80 | -0.02 | -0.11 |
| CS 22891-209 | -3.25 | 1.90 | 0.17 | 0.15 | | | | | |

Таблица 6. (Продолжение)

| Name | [Fe/H] | ξ_{turb} | [Al/Fe] | [Na/Fe] | Name | [Fe/H] | ξ_{turb} | [Al/Fe] | [Na/Fe] |
|---------------------|--------|---------------------|---------|---------|-----------|--------|---------------------|---------|---------|
| Carrera et al. [35] | | | | | | | | | |
| Be 32 1948 | -0.26 | 1.50 | 0.00 | -0.07 | H 070 | 0.09 | 1.25 | 0.07 | 0.21 |
| NGC 001 | -0.13 | 1.50 | -0.02 | 0.06 | Pr 212 | 0.10 | 1.30 | -0.01 | 0.17 |
| NGC 208 | 0.04 | 1.10 | -0.11 | -0.08 | Pr 253 | 0.18 | 1.40 | 0.01 | 0.14 |
| H 028 | 0.15 | 1.20 | -0.02 | 0.15 | Pr 283 | 0.09 | 1.30 | 0.02 | -0.07 |
| H 041 | 0.09 | 1.30 | 0.01 | 0.14 | | | | | |
| Jonsell et al. [36] | | | | | | | | | |
| HD 017072 | -0.98 | 1.50 | 0.36 | — | HD 120559 | -0.99 | 1.40 | 0.38 | 0.18 |
| HD 025704 | -0.97 | 1.50 | 0.46 | — | HD 124785 | -0.69 | 1.50 | 0.34 | — |
| HD 049301 | -0.82 | 1.50 | 0.37 | — | HD 126793 | -0.81 | 1.50 | 0.42 | — |
| HD 061902 | -0.71 | 1.50 | 0.21 | — | HD 132475 | -1.46 | 1.40 | 0.60 | 0.04 |
| HD 063598 | -0.84 | 1.50 | 0.28 | — | HD 142945 | -0.95 | 1.20 | 0.40 | 0.11 |
| HD 076932 | -0.89 | 1.50 | 0.33 | — | HD 144450 | -1.15 | 1.10 | 0.40 | 0.03 |
| HD 078747 | -0.80 | 1.50 | 0.44 | — | HD 145417 | -1.30 | 1.50 | 0.24 | — |
| HD 079601 | -0.74 | 1.50 | 0.35 | — | HD 160617 | -1.70 | 1.30 | — | 0.17 |
| HD 080863 | -0.61 | 1.50 | 0.30 | — | HD 166913 | -1.45 | 1.20 | — | -0.16 |
| HD 091121 | -1.05 | 1.30 | 0.49 | 0.03 | HD 193901 | -1.22 | 1.40 | — | -0.12 |
| HD 094028 | -1.32 | 1.30 | 0.66 | -0.09 | HD 196892 | -1.09 | 1.50 | 0.52 | — |
| HD 097320 | -1.19 | 1.50 | 0.41 | 0.09 | HD 199289 | -1.05 | 1.40 | 0.43 | 0.11 |
| HD 099682 | -0.45 | 1.50 | 0.12 | — | HD 201891 | -1.06 | 1.10 | 0.51 | 0.12 |
| HD 101976 | -0.49 | 1.50 | 0.12 | — | HD 203608 | -0.74 | 1.50 | 0.19 | — |
| HD 102200 | -1.19 | 1.40 | — | -0.09 | HD 211998 | -1.40 | 1.10 | 0.50 | -0.14 |
| HD 111777 | -0.85 | 1.50 | 0.43 | — | HD 213467 | -1.43 | 1.50 | 0.30 | — |
| HD 116064 | -1.87 | 1.50 | — | -0.02 | | | | | |

$-0.4 \leq [\text{Fe}/\text{H}] \leq 0.3$. Эквивалентные ширины из работ [31] и [37] для звезд близкой металличности приводят к большим на 0.06 dex средним значениям $[\text{Na}/\text{Fe}]$ по сравнению с [28, 35]. Из Рис. 1а следует, что звезды из выборки [36] в диапазоне $-1.7 \leq [\text{Fe}/\text{H}] \leq -1.0$ показывают на 0.10 dex меньшие значения содержания натрия, чем звезды из работы [37]. Отмеченный избыток $[\text{Na}/\text{Fe}]$ для выборки [37] может быть обусловлен как неполным учетом отклонений от ЛТР в холодных гигантах солнечной металличности, так и частичным обогащением их атмосфер натрием при выносе на

поверхность продуктов Ne-Na-цикла. Для звезд из работы [38] наблюдается более низкое отношение $[\text{Na}/\text{Fe}]$, чем для объектов из других выборок, что корректно объясняется особенностями изменений содержания натрия в процессе химической эволюции (см. ниже). В целом мы пришли к выводу, что значения $[\text{Na}/\text{Fe}]$, найденные по данным всех использованных работ, не имеют систематических отклонений более 0.10 dex и могут исследоваться совместно. На Рис. 1а сплошной линией показана теоретическая кривая из работы [2], штриховой линией — теоретическая кривая из работы [4]. Обе

теоретические кривые в целом вполне удовлетворительно соответствуют полученным результатам.

Содержания алюминия, определенные для звезд из выборки [36] в диапазоне $-0.5 \leq [\text{Fe}/\text{H}] \leq 0.3$, оказываются на $0.15\text{--}0.20$ dex меньше содержания для звезд такой же металличности из выборок [28] и [37], которые, в свою очередь, хорошо соответствуют друг другу. Количество объектов из выборок [35] и [31], для которых были определены содержания алюминия, относительно невелико, поэтому для них (учитывая, что в диапазоне $-0.5 \leq [\text{Fe}/\text{H}] \leq 0.3$ средний разброс результатов составляет 0.20 dex) не удается обнаружить явные закономерности.

Так же, как и на Рис. 1а, на Рис. 1б сплошной линией показана теоретическая кривая из работы [2], штриховой линией — теоретическая кривая из работы [4]. Кроме того, на Рис. 1б пунктиром показана теоретическая кривая химической эволюции для алюминия из работы [7], соответствующей теоретическим предсказаниям [1]. В целом, для всех выборок в диапазоне металличностей $-1.5 \leq [\text{Fe}/\text{H}] \leq 0.3$ наблюдается некоторый избыток содержания алюминия относительно теоретических предсказаний. При этом заметно, что этот избыток несколько возрастает по мере уменьшения металличности. По всей видимости, такое изменение связано с ростом не-ЛТР поправок к содержанию алюминия, как это следует из теоретических соображений [19, 20, 22].

Для звезд малой металличности (гиганты и сверхгиганты из выборки [38]), для которых отклонения от ЛТР существенны, а содержание алюминия может быть определено только по резонансным линиям $\lambda\lambda 3944, 3961 \text{ \AA}$, наилучшее согласие полученных результатов и теоретических предсказаний достигается для кривой химической эволюции алюминия из работы [4], где было принято во внимание влияние отклонений от ЛТР.

ЛТР содержания натрия, представленные на Рис. 2а совместно с данными теоретического моделирования эволюции $[\text{Na}/\text{Fe}]$ из работ [2, 4], показывают повышенное на $\Delta[\text{Na}/\text{Fe}] \approx 0.15$ dex значение для звезд солнечной металличности, дальнейший рост до $[\text{Na}/\text{Fe}] \approx 0.35$ при $[\text{Fe}/\text{H}] \approx -0.8$ и снижение до $[\text{Na}/\text{Fe}] \approx 0.00$ при $[\text{Fe}/\text{H}] \approx -1.5$. Такое распределение $[\text{Na}/\text{Fe}]$ – $[\text{Fe}/\text{H}]$ в интервале металличностей $-1.5 \leq [\text{Fe}/\text{H}] \leq 0.3$ хорошо согласуется с теоретическим прогнозом Кобаяши и др. [4] и удовлетворительно — с прогнозом Самланда [2]. Однако лавинообразный рост ЛТР содержания до $[\text{Na}/\text{Fe}] = 0.3\text{--}0.6$ в звездах гало полностью не соответствует всем моделям химической эволюции.

Для ЛТР содержания алюминия, представленных на Рис. 2б, в диапазоне металличностей

$-1.5 \leq [\text{Fe}/\text{H}] \leq 0.3$ наилучшее соответствие с теоретическими предсказаниями наблюдается для теоретической кривой [7]. Однако для звезд малой металличности заметно резкое ($\Delta[\text{Al}/\text{Fe}] \approx 0.7$ dex) уменьшение содержания алюминия по сравнению с теоретической кривой. Для объяснения такого различия между теорией и результатами расчетов Самланд [2] предложил увеличить эффективность синтеза алюминия в пять раз в реакциях нейтронного захвата атомами магния относительно теоретических предсказаний [7]. В результате Самланду удалось достичь хорошего согласия полученного распределения $[\text{Al}/\text{Fe}]$ – $[\text{Fe}/\text{H}]$ с наблюдениями на всем диапазоне металличностей. Однако в более поздних работах (например, Коябаяши и др. [4]) показано, что данное резкое уменьшение содержания алюминия в звездах гало и балджа должно быть связано со значительными отклонениями от ЛТР, которые для резонансных линий Al I, используемых для определения содержания элементов в звездах гало и балджа, велики.

Не-ЛТР поправки содержания $\Delta_{\text{non-LTE}}$, рассчитанные как разность не-ЛТР и ЛТР содержания элемента в каждой звезде, показаны для Na I на Рис. 3а, а для Al I — на Рис. 3б.

Отметим, что эффекты отклонений от ЛТР в атоме Na I оказываются наименьшими в атмосфере Солнца. В результате не-ЛТР поправки содержания натрия во всех звездах оказываются отрицательными. Для всех звезд, у которых содержание натрия определялись по группе субординатных линий, не-ЛТР поправки варьируются в пределах $\Delta_{\text{non-LTE}} = (-0.03)\text{--}(-0.18)$ dex и не показывают существенной зависимости от металличности. Для звезд гало, исследуемых по резонансным линиям, наблюдается сильное возрастание поправок от $\Delta_{\text{non-LTE}} \approx -0.02$ dex при $[\text{Fe}/\text{H}] = -4.0$ до $\Delta_{\text{non-LTE}} \approx -0.65$ при $[\text{Fe}/\text{H}] = -2.6$ dex с большим разбросом индивидуальных значений при конкретном значении $[\text{Fe}/\text{H}]$. Таким образом, определение содержания натрия в таких звездах допустимо только в рамках не-ЛТР подхода с выполнением отдельных расчетов для каждого исследуемого объекта.

Для Al I имеет место явление “сверхионизации” (основное состояние — уровень $3p$ — недонаселено в области формирования спектральных линий) [22]. В результате на глубинах формирования линий населенности уровней оказываются меньше, чем при ЛТР, поэтому линии Al I будут ослаблены по сравнению с ЛТР, а не-ЛТР поправки к содержанию Al будут положительными.

Отклонения от ЛТР для атома Al I несущественны ($\Delta_{\text{non-LTE}} \approx 0.1$) для звезд спектральных классов F–K нормальной металличности, но резко возрастают с ростом температуры ($T_{\text{eff}} > 6000$ K)

и уменьшением металличности. Для звезд гало, содержание алюминия в которых можно определить только по резонансным линиям $\lambda\lambda 3944, 3961 \text{ \AA}$, величины поправок могут достигать значений $\Delta_{\text{non-LTE}} = 0.7 \text{ dex}$ при $[\text{Fe}/\text{H}] = -2.0$ и $\Delta_{\text{non-LTE}} = 1.1 \text{ dex}$ при $[\text{Fe}/\text{H}] = -4.0$. Таким образом, определение содержаний алюминия в звездах гало и балджа, как и в случае натрия, должно осуществляться только с использованием не-ЛТР методики.

Определенные нами не-ЛТР содержания натрия и алюминия показаны на Рис. 4а и 4б, где открытыми кружками выделены звезды с $\log g > 3.0$, а сплошными кружками — звезды с $\log g \leq 3.0$. Как следует из Рис. 4, средние содержания натрия и алюминия в звездах разных типов светимости на диапазоне металличности $-1.7 \leq [\text{Fe}/\text{H}] \leq 0.3$ не имеют систематических отличий. Это позволяет использовать все звезды из данных выборок для построения единых зависимостей $[\text{Na}/\text{Fe}]$ – $[\text{Fe}/\text{H}]$ и $[\text{Al}/\text{Fe}]$ – $[\text{Fe}/\text{H}]$.

Полученные не-ЛТР содержания натрия в сравнении с теоретическими распределениями $[\text{Na}/\text{Fe}]$ – $[\text{Fe}/\text{H}]$ [2, 4] показаны на Рис. 4а. При большом разбросе индивидуальных значений $[\text{Na}/\text{Fe}]$ (до 0.3 dex) выделяется интервал почти постоянной средней величины $[\text{Na}/\text{Fe}] \approx 0.05$ при $-0.6 \leq [\text{Fe}/\text{H}] \leq 0.3$. При переходе к звездам толстого диска Галактики на $[\text{Fe}/\text{H}] \approx -0.7$, возможно, имеется резкий рост содержания натрия до $[\text{Na}/\text{Fe}] \approx 0.25$ с последующим его плавным уменьшением до $[\text{Na}/\text{Fe}] \approx -0.03$ при $[\text{Fe}/\text{H}] \approx -1.5$. Данное понижение в целом прослеживается в звездах гало с достижением значения $[\text{Na}/\text{Fe}] \approx -0.2$ на $[\text{Fe}/\text{H}] \approx -4.0$. Следует отметить неуклонно возрастающую с уменьшением металличности дисперсию индивидуальных содержаний натрия и появление в гало звезд с аномально большими избытками содержания элемента до $\Delta[\text{Na}/\text{Fe}] \approx 0.4 \text{ dex}$ относительно среднего значения. В целом наблюдаемое распределение $[\text{Na}/\text{Fe}]$ – $[\text{Fe}/\text{H}]$, полученное в данной работе, соответствует теоретической зависимости Самланда [2] для всего исследуемого диапазона металличности, однако содержит отмеченный выше скачок в точке разделения звезд тонкого и толстого дисков при $[\text{Fe}/\text{H}] \approx -0.7$. Распределение [4] частично воспроизводит данный скачок, но предсказывает аномально высокое содержание натрия в звездах тонкого диска ($[\text{Na}/\text{Fe}] \approx 0.2$) и аномально низкое — в гало ($[\text{Na}/\text{Fe}] \approx -0.37$).

На Рис. 4б представлены результаты определения не-ЛТР содержаний алюминия в исследуемых звездах $[\text{Al}/\text{Fe}]$ – $[\text{Fe}/\text{H}]$. Несмотря на некоторую дисперсию значений $[\text{Al}/\text{Fe}]$ на интервале от $[\text{Fe}/\text{H}] = 0.5$ до $[\text{Fe}/\text{H}] = -1.5$ (т.е. для звезд

тонкого и частично толстого дисков Галактики), отчетливо выражен плавный рост содержания алюминия в исследуемых звездах от $[\text{Al}/\text{Fe}] \approx 0.0$ до $[\text{Al}/\text{Fe}] = 0.6$. К сожалению, среди имеющихся в рассматриваемых выборках объектов только одна звезда, для которой измерены эквивалентные ширины линий алюминия, попадает в диапазон металличностей $-2.4 \leq [\text{Fe}/\text{H}] \leq -1.5$. Поэтому в данном диапазоне металличностей имеется некоторый пробел. При рассмотрении звезд гало ($-4.0 \leq [\text{Fe}/\text{H}] \leq -2.4$) среднее значение содержания алюминия $[\text{Al}/\text{Fe}]$ плавно возрастает по мере уменьшения металличности от -0.08 при $[\text{Fe}/\text{H}] \approx -2.4$ до 0.12 при $[\text{Fe}/\text{H}] \approx -4.0$, со средним разбросом значений 0.20 dex .

При сравнении с теоретическими зависимостями оказывается, что в области звезд нормальной металличности и звезд с умеренным дефицитом наилучшее соответствие между полученными данными и теорией имеет место для зависимости из работы [7], а для звезд малой металличности с полученными результатами наилучшим образом согласуется теоретическая кривая [4]. Теоретическая кривая Самланда [2], полученная без учета влияния не-ЛТР эффектов на определение содержания, хуже всего соответствует полученным результатам.

В целом можно считать, что наблюдаемое распределение $[\text{Al}/\text{Fe}]$ – $[\text{Fe}/\text{H}]$, полученное в данной работе, достаточно хорошо соответствует теоретической зависимости Кобаяши [4] практически для всего исследуемого диапазона металличности.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе проведено определение не-ЛТР содержаний натрия и алюминия для значительной (160 объектов) выборки звезд диска и гало Галактики с металличностью $-4.0 \leq [\text{Fe}/\text{H}] \leq 0.3$. Получены наблюдаемые распределения содержаний натрия ($[\text{Na}/\text{Fe}]$ – $[\text{Fe}/\text{H}]$) и алюминия ($[\text{Al}/\text{Fe}]$ – $[\text{Fe}/\text{H}]$) и проведено их сравнение с теоретическими предсказаниями.

Полученные для звезд гало ($-4.0 \leq [\text{Fe}/\text{H}] \leq -2.0$) ЛТР распределения $[\text{Na}/\text{Fe}]$ – $[\text{Fe}/\text{H}]$ и $[\text{Al}/\text{Fe}]$ – $[\text{Fe}/\text{H}]$ с избытком содержания натрия до $[\text{Na}/\text{Fe}] = 0.6 \text{ dex}$ и дефицитом алюминия до $[\text{Al}/\text{Fe}] = -0.5 \text{ dex}$ качественно противоречат прогнозам существующих моделей химической эволюции Галактики.

Соответствие между наблюдаемыми распределениями и их теоретическим предсказаниями возможно только при корректном учете не-ЛТР поправок в содержаниях Na и Al, особенно важном при исследовании звезд гало, где содержание данных элементов определяется по резонансным

линиям с наибольшими отклонениями от ЛТР. Таким образом, определение содержаний натрия и алюминия в звездах малой металличности ($-4.0 \leq [\text{Fe}/\text{H}] \leq -2.0$) допустимо только в рамках не-ЛТР подхода с выполнением отдельных расчетов для каждого исследуемого объекта.

Итоговое наблюдаемое не-ЛТР распределение $[\text{Na}/\text{Fe}]$ – $[\text{Fe}/\text{H}]$ в целом совпадает в пределах 0.15 dex с теоретическими распределениями из работ Самланда [2] и Кобаяши и др. [4], что указывает на корректность современных моделей синтеза натрия.

Полученное в рамках данной работы не-ЛТР распределение $[\text{Al}/\text{Fe}]$ – $[\text{Fe}/\text{H}]$ имеет удовлетворительное согласие до 0.2 dex с теоретическими данными Кобаяши и др. [4], но сильно различается как с прогнозами Самланда [2] (до 0.4 dex), так и с результатами расчетов [7] (до 0.3 dex). Для звезд тонкого диска ($-0.7 \leq [\text{Fe}/\text{H}] \leq 0.28$) наилучшее соответствие между наблюдаемыми содержаниями Al и теоретическими прогнозами достигается с применением моделей [7]. Для результатов Кобаяши и др. [4] характерно расхождение с данными наблюдений, возрастающее с уменьшением металличности от 0.0 dex при $0.0 \leq [\text{Fe}/\text{H}] \leq 0.28$ до 0.15 dex при $[\text{Fe}/\text{H}] \approx -0.7$. Подобные различия не могут быть обусловлены ошибками наблюдений или их анализа и, вероятно, связаны с избыточной оценкой производства алюминия при гидростатическом горении углерода. Предложенное Самландом [2] искусственное увеличение в пять раз (относительно теоретических моделей [1, 7]) эффективности синтеза алюминия в реакциях нейтронного захвата атомами магния, очевидно, неверно. Как показано Кобаяши и др. [4], при определении содержаний алюминия в звездах низкой металличности, где, как правило, возможен анализ лишь резонансных линий, важным оказывается корректный учет отклонений от ЛТР. В пользу данного утверждения говорит удовлетворительное (до 0.20 dex) совпадение теоретических прогнозов Кобаяши и др. [4] и полученного в данной работе не-ЛТР распределения $[\text{Al}/\text{Fe}]$ – $[\text{Fe}/\text{H}]$.

Сравнение теоретических и полученных нами не-ЛТР содержаний алюминия как в звездах диска, так и в гало Галактики свидетельствует о необходимости дальнейшего уточнения теории его ядерного синтеза в процессе химической эволюции Галактики.

Полезно проанализировать найденные нами не-ЛТР содержания $[\text{Na}/\text{Fe}]$ и $[\text{Al}/\text{Fe}]$ в звездах различных металличностей с точки зрения основных механизмов их формирования. Как известно, оба элемента образуются одновременно в реакциях гидростатического горения углерода в ядрах массивных звезд и раздельно в реакциях нейтронного

захвата атомами неона (при синтезе Na) и магния (при синтезе Al). Очевидно, что различия в не-ЛТР содержаниях Na и Al обусловлены особенностями протекания реакций нейтронного захвата и их вкладом в общий синтез этих элементов. Качественный анализ полученных нами данных позволяет сделать следующие выводы об этом вкладе и условиях формирования содержаний натрия и алюминия.

1. Высокая дисперсия индивидуальных содержаний натрия ($\Delta[\text{Na}/\text{Fe}] = 0.4$ dex) говорит о сильном влиянии на них реакций нейтронного захвата атомами неона (Ne-Na-цикл). Подобная дисперсия может формироваться в результате неполного перемешивания межзвездной среды, обогащенной вновь синтезированным веществом после взрыва сверхновых. Однако в этом случае следует ожидать уменьшения ее амплитуды при переходе от звезд гало к звездам диска, что не соответствует наблюдениям. Поэтому можно предположить, что дисперсия образуется вследствие выноса на поверхность некоторых звезд вещества с избытками натрия, синтезированного в Ne-Na-цикле слоевого источника. Аналогичный Mg-Al-цикл синтеза алюминия может проходить только в ядрах звезд, что препятствует выносу алюминия на поверхность и приводит к меньшей дисперсии содержания $[\text{Al}/\text{Fe}]$.

2. Соответствие полученных содержаний натрия прогнозам его химической эволюции доказывает корректность современных моделей его синтеза при гидростатическом горении углерода в ядрах звезд разных масс. Одновременность синтеза Na и Al в этом процессе позволяет утверждать, что существующие различия в наблюдаемых содержаниях $[\text{Al}/\text{Fe}]$ и теоретических прогнозах обусловлены только ошибками в оценке эффективности Mg-Al-цикла. Очевидно, что оценка эффективности Mg-Al-цикла в базовой теории [7] оказывается завышенной, а модифицированная оценка Самланда [2] — заниженной. Представляется оптимальным, следуя идее [2], уменьшить эффективность Mg-Al-цикла в 1.7–2.3 раза по сравнению классической теорией [7].

3. Актуальной проблемой остается корректная нормировка содержаний на солнечные значения при построении моделей ядерного синтеза Na и Al. Из результатов проделанной работы следует, что подавляющее число звезд солнечной металличности показывает значимый избыток содержания натрия около 0.1 dex. Однако результаты расчетов Самланда [2] не показывают подобного избытка, а в расчетах Кобаяши и др. [4] он оказывается завышен примерно в два раза. В результате можно сделать вывод о неточности заданного современного содержания натрия в рамках обеих моделей.

Напротив, содержание алюминия в атмосферах звезд с $[Fe/H] \approx 0$ в целом соответствует как наблюдаемому солнечному значению, так и определенному во всех моделях химической эволюции.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят А.И. Галеева за предоставление наблюдательных данных для исследованной им выборки звезд. Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ 13-02-00351-а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. P. X. Timmes, S. E. Woosley, and T. A. Weaver, *Astrophys. J. Suppl.* **98**, 617 (1995).
2. M. Samland, *Astrophys. J.* **496**, 155 (1998).
3. A. Alibes, J. Labay, and R. Canal, *Astronom. and Astrophys.* **370**, 1103 (2001).
4. C. Kobayashi, H. Umeda, K. Nomoto, et al., *Astrophys. J.* **653**, 1145 (2006).
5. P. A. Denisenkov and S. N. Denisenkova, *Sov. Astron. Lett.* **16**, 275 (1990).
6. A. Goswami and N. Prantzos, *Astronom. and Astrophys.* **359**, 191 (2000).
7. S. E. Woosley and T. A. Weaver, *Astrophys. J. Suppl.* **101**, 181 (1995).
8. J. H. Bruls, R. J. Rutten, and N. Shchukina, *Astronom. and Astrophys.* **265**, 237 (1992).
9. L. I. Mashonkina, N. A. Sakhbullin, and V. V. Shimanskii, *Astronomy Reports* **37**, 192 (1993).
10. L. I. Mashonkina, V. V. Shimanskii, and N. A. Sakhbullin, *Astronomy Reports* **44**, 790 (2000).
11. K. Lind, M. Asplund, P. S. Barklem, and A. K. Belyaev, *Astronom. and Astrophys.* **528**, 103 (2004).
12. Y. Takeda, *Publ. Astronom. Soc. Japan* **47**, 463 (1985).
13. D. Baumuller, K. Butler, and T. Gehren, *Astronom. and Astrophys.* **338**, 637 (1998).
14. Y. Takeda, G. Zhao, M. Takada-Hidai, et al., *Astronom. and Astrophys.* **3**, 316 (2003).
15. J. R. Shi, T. Gehren, and G. Zhao, *Astronom. and Astrophys.* **423**, 683 (2004).
16. T. Gehren, Y. C. Liang, J. R. Shi, et al., *Astronom. and Astrophys.* **413**, 104 (2004).
17. S. M. Andrievsky, M. Spite, S. A. Korotin, et al., *Astronom. and Astrophys.* **464**, 1081 (2007).
18. Y. Takeda, D. Kang, I. Han, et al., *Publ. Astronom. Soc. Japan* **61**, 1365 (2009).
19. T. Gehren, C. Reile, and W. Steenbock, in *Proc. of Advanced Research Workshop, Stellar Atmospheres: Beyond Classical Models* (Kluwer, Dordrecht, 1991), p. 387.
20. D. Baumuller and T. Gehren, *Astronom. and Astrophys.* **307**, 961 (1996).
21. В. С. Менжевицкий, В. В. Шиманский, Н. Н. Шиманская, *Ученые записки Казанского государственного университета* **153**, 95 (2010).
22. V. S. Menzhevitski, V. V. Shimansky, and N. N. Shimanskaya, *Astrophysical Bulletin* **67**, 294 (2012).
23. I. F. Bikmaev, T. A. Ryabchikova, H. Brunt, et al., *Astronom. and Astrophys.* **389**, 537 (2002).
24. P. J. D. Mauas, R. F. Borda, and M. L. Luoni, *Astrophys. J. Suppl.* **142**, 285 (2002).
25. L. Mashonkina, L. Zhao, T. Gehren, et al., *Astronom. and Astrophys.* **478**, 529 (2008).
26. M. J. Seaton, C. J. Zeippen, J. A. Tully, et al., *Rev. Mex. Astron. Astrofis.* **23**, 19 (1992).
27. J. L. Kohl and W. H. Parkinson, *Astrophys. J.* **184**, 641 (1973).
28. A. I. Galeev, I. F. Bikmaev, L. I. Mashonkina, et al., *Astronomy Reports* **48**, 511 (2004).
29. V. V. Shimansky, I. F. Bikmaev, A. I. Galeev, et al., *Astronomy Reports* **47**, 750 (2003).
30. F. A. Musaeu, *Astronomy Letters* **22**, 715 (1996).
31. J. Tomkin, B. Edvardsson, D. L. Lambert, and B. Gustafsson, *Astronom. and Astrophys.* **327**, 587 (1997).
32. G. P. Di Benedetto, *Astronom. and Astrophys.* **339**, 858 (1998).
33. A. Alonso, S. Arribas, and C. Martinez-Roger, *Astronom. and Astrophys.* **313**, 873 (1996).
34. F. van Leeuwen, *Astronom. and Astrophys.* **474**, 653 (2007).
35. R. Carrera and E. Pancino, *Astronom. and Astrophys.* **535**, 30 (2011).
36. K. Jonsell, B. Edvardsson, B. Gustafsson, et al., *Astronom. and Astrophys.* **440**, 321 (2005).
37. A. Alves-Brito, J. Melendez, M. Asplund, et al., *Astronom. and Astrophys.* **513**, 70 (2010).
38. R. Cayrel, E. Depagne, M. Spite, et al., *Astronom. and Astrophys.*
39. B. Edvardsson, J. Andersen, B. Gustafsson, et al., *Astronom. and Astrophys.* **275**, 101 (1993).
40. J. P. Fulbright, *Astronom. J.* **120**, 1841 (2000).
41. R. L. Kurucz, I. Furenlid, J. Brault, and L. Testerman, in *Solar Flux Atlas from 296 to 1300nm* (New Mexico, 1984).
42. N. Grevesse, A. Noels, and A. J. Sauval, *ASP Conf. Ser.* **99**, 117 (1996).
43. R. L. Kurucz, *SAO CD-Roms. (MA02138, Cambridge, 1994).*
44. L. H. Auer and J. Heasley, *Astrophys. J.* **205**, 165 (1976).
45. Н. А. Сахибуллин, *Труды Казанск. гор. астрон. обсерв.* **48**, 9 (1983).
46. S. E. Nersisyan, A. V. Shavrina, and A. A. Yaremchuk, *Astrophysics* **30**, 147 (1989).
47. N. N. Shimanskaya, I. F. Bikmaev, and V. V. Shimansky, *Astrophysical Bulletin* **66**, 332 (2011).
48. F. Castelli and R. L. Kurucz, *IAUS* **210**, A20 (2003).
49. N. Grevesse and A. J. Sauval, *Space Sci. Rev.* **85**, 161 (1998).
50. J. G. Cohen, W. Huang, and E. N. Kirby, *Astrophys. J.* **114**, 1030 (1997).

Observational Restrictions on Sodium and Aluminium Abundance Variations in Evolution of the Galaxy

V. S. Menzhevitski, N. N. Shimanskaya, V. V. Shimansky, N. A. Sakhibullin

In this paper we construct and analyze the uniform non-LTE distributions of the aluminium ($[Al/Fe]-[Fe/H]$) and sodium ($[Na/Fe]-[Fe/H]$) abundances in the sample of 160 stars of the disk and halo of our Galaxy with metallicities within $-4.07 \leq [Fe/H] \leq 0.28$. The values of metallicity $[Fe/H]$ and microturbulence velocity ξ_{turb} indices are determined from the equivalent widths of the Fe II and Fe I lines. We estimated the sodium and aluminium abundances using a 21-level model of the Na I atom and a 39-level model of the Al I atom. The resulting LTE distributions of $[Na/Fe]-[Fe/H]$ and $[Al/Fe]-[Fe/H]$ do not correspond to the theoretical predictions of their evolution, suggesting that a non-LTE approach has to be applied to determine the abundances of these elements. The account of non-LTE corrections reduces by 0.05–0.15 dex the abundances of sodium, determined from the subordinate lines in the stars of the disk with $[Fe/H] \geq -2.0$, and by 0.05–0.70 dex (with a strong dependence on metallicity) the abundances of $[Na/Fe]$, determined by the resonance lines in the stars of the halo with $[Fe/H] \leq -2.0$. The non-LTE corrections of the aluminium abundances are strictly positive and increase from 0.0–0.1 dex for the stars of the thin disk ($-0.7 \leq [Fe/H] \leq 0.28$) to 0.03–0.3 dex for the stars of the thick disk ($-1.5 \leq [Fe/H] \leq -0.7$) and 0.06–1.2 dex for the stars of the halo ($[Fe/H] \leq -2.0$). The resulting non-LTE abundances of $[Na/Fe]$ reveal a scatter of individual values up to $\Delta[Na/Fe] = 0.4$ dex for the stars of close metallicities. The observed non-LTE distribution of $[Na/Fe]-[Fe/H]$ within 0.15 dex coincides with the theoretical distributions of Samland and Kobayashi et al. The non-LTE aluminium abundances are characterized by a weak scatter of values (up to $\Delta[Al/Fe] = 0.2$ dex) for the stars of all metallicities. The constructed non-LTE distribution of $[Al/Fe]-[Fe/H]$ is in a satisfactory agreement to 0.2 dex with the theoretical data of Kobayashi et al., but strongly differs (up to 0.4 dex) from the predictions of Samland.

Keywords: *stars: abundances—Galaxy: evolution*