РЕЗУЛЬТАТЫ неЛТР-МОДЕЛИРОВАНИЯ ЛИНИЙ Al I В СПЕКТРАХ ЗВЕЗД ПОЗДНИХ КЛАССОВ

В. С. Менжевицкий, В. В. Шиманский, Н. Н. Шиманская

Казанский государственный университет, Казань, Россия
e-mail: vt@ksu.ru

В работе выполнен анализ формирования линий Al I в спектрах звезд при отказе от предположения локального термодинамического равновесия (ЛТР). Расчеты проведены на основе 38-уровенной модели атома Al I для бланкетированных моделей атмосфер Куруца с параметрами $T_{\text{эф}} = 4000$–9000 K (с шагом 250 K), $\lg g = 0.0$–4.5 (с шагом 0.5) и содержанием тяжелых элементов $[\mathrm{A}] = 0.0; -1.0; -2.0$. Показано, что для атома Al I имеет место эффект "сверхионизации": основное состояние $3p$ недонаселено в области формирования спектральных линий. Механизм недонаселения связан с преобладанием радиативной ионизации с основного уровня над каскадными переходами с высоковозбужденных уровней, причиной которого является большое значение сечения ионизации уровня $3p$. Этот эффект выражен тем ярче, чем выше температура звезды и ниже её металличность. На основе исследования профилей и эквивалентных ширин шести линий в спектре Солнца выполнено уточнение ряда атомных параметров. Для рассматриваемых линий Al I рассчитаны сетки неЛТР-поправок к содержанию Al, определенному в предположении ЛТР: $\Delta X_{\mathrm{NLTE}} = \lg \varepsilon_{\mathrm{NLTE}} - \lg \varepsilon_{\mathrm{LTE}}$. НеЛТР-поправки к содержанию алюминия существенны и достигают величин (0.3–0.5) dex для субординатной линии $\lambda\, 7362.29$ Å и (0.2–0.45) dex для резонансной линии $\lambda\, 3944.01$ Å, а в случае малой металличности ($[\mathrm{A}] = -2.0$) достигают для линии $\lambda\, 3944.01$ Å величины (0.4–1.0) dex.

В настоящее время одним из самых эффективных инструментов для исследования звезд и определения их фундаментальных параметров является метод моделей атмосфер. Однако, при исследовании спектров с применением этого метода могут возникать ошибки, если расчеты выполняются в рамках гипотезы локального термодинамического равновесия (ЛТР). Отклонения от ЛТР в заселении атомов по состояниям могут быть вызваны ионизацией атомов ультрафиолетовым потоком, выходящим из глубоких слоев атмосферы звезды; инфракрасной фоторекомбинацией электронов на верхние уровни атома, близкие к континууму; каскадными переходами с верхних уровней на нижние; перераспределением атомов по состояниям благодаря фотовозбуждениям.

Для вычисления населенностей уровней при отказе от гипотезы ЛТР требуется совместное решение уравнений переноса излучения и статистического равновесия. Это существенно усложняет расчеты и требует особой методики.

Расчеты неЛТР-населенностей уровней и эквивалентных ширин линий проводились с помощью программного комплекса NONLTE3 (в последней модификации), разработанного Н. А. Сахибуллиным [1]. В основе этого комплекса лежит метод полной линеаризации в варианте Ауэра и Хисли [2]. При вычислении коэффициента поглощения в непрерывном спектре для каждой частоты были учтены все источники непрерывного поглощения, а также учитывался вклад многочисленных спектральных линий прямым суммированием на каждой частоте коэффициента поглощения в них. Список линий составлен на основе списка Куруца [3] и содержит около 170 тыс. линий с длинами волн больше 91.2 нм. Также учитывалось молекулярное поглощение по данным, предоставленным Я. В. Павленко (ГАО НАН Украины) [4].

В расчетах использовалась 38-уровенная модель атома Al I, которая включает все уровни с $l \leq 3$ и $n \leq 12$ атома Al I и уровень, соответствующий основному состоянию Al II. Энергия ионизации с последнего рассматриваемого возбужденного уровня составляет около 0.4 эВ, что позволяет использовать данную модель для анализа содержания Al I в атмосферах звезд с $T_{\text{эф}} > 4000$ K. В модели учитывалось тонкое расщепление состояния $3p$, важность которого в неЛТР-расчетах была показана в ряде работ по неЛТР-моделированию линий некоторых элементов (например [5, 6]).

Энергии уровней рассчитаны по длинам волн соответствующих переходов; силы осцилляторов и сечения атомных процессов взяты из базы атомных данных TOPbase [7].

Все расчеты выполнялись для бланкетированных моделей Куруца [8]. Были рассчитаны профили шести линий: двух резонансных ($\lambda\lambda$ 3944.01 Å, 3961.52 Å) и четырех субординатных ($\lambda\lambda$ 6693.03 Å, 6698.68 Å, 7362.29 Å, 7836.13 Å), доступных наблюдению в диапазоне от 3900 Å до 9000 Å.

При получении теоретических профилей и эквивалентных ширин нами учитывались доплеровское уширение от теплового движения и микротурбулентности V_{turb}, естественное затухание и ван-дер-ваальсовское уширение, рассчитываемое по формуле Грея с константами C_6, определенными согласно оценке Унзольда [9].

Подробно методика проведения подобных неЛТР-расчетов для различных элементов неоднократно описывалась в ряде статей (например [10–12]), поэтому на деталях этой методики мы не будем останавливаться, а изложим основные моменты проделанной работы.

Тестирование модели и уточнение параметров исследуемых линий было проведено на основе анализа спектра Солнца. Солнце выбрано как звезда с надежно измеренными фундаментальными параметрами, для которой имеются наблюдения высокого качества. Таким образом, для Солнца можно анализировать профили линий, что содержит больше информации, чем эквивалентные ширины.

Результат согласования наблюдаемых профилей линий Al I с теоретическими неЛТР-профилями позволяет произвести уточнение параметров выбранных линий с целью их дальнейшего использования при анализе химического содержания Al в звездах поздних классов. В частности, при расчете профилей исследуемых линий, которые могут использоваться при определении содержания Al I, ван-дер-ваальсовское уширение учитывалось с C_6, определенными из сравнения теоретических и наблюдаемых профилей линий в спектре Солнца.

На рис. 1 представлено согласование профилей для двух из рассматриваемых линий. Штриховой линией показан теоретический профиль, сплошной – наблюдаемый профиль данной линии в спектре Солнца.

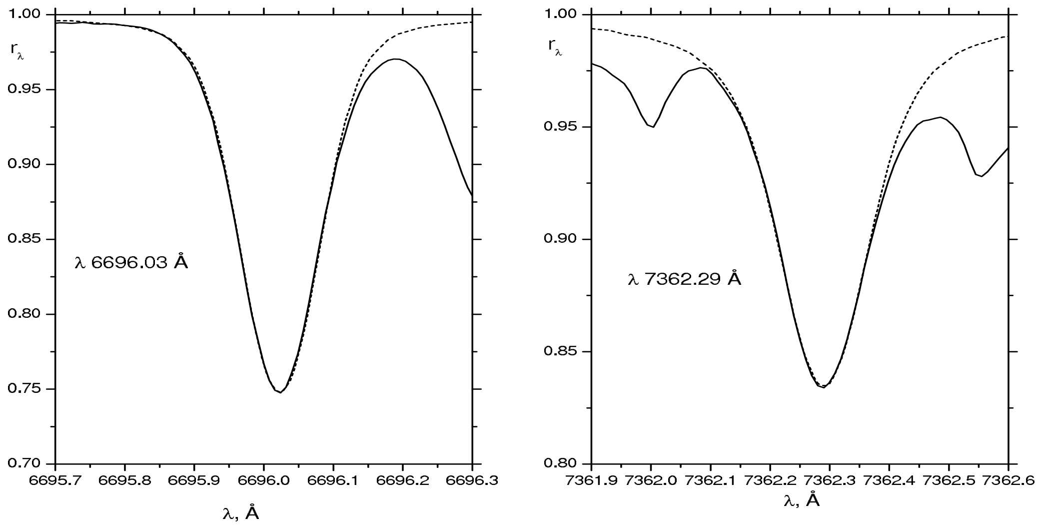

Рис. 1. Согласование теоретических профилей линий λ 6696.03 Å и λ 7362.29 Å с наблюдаемыми в спектре Солнца

Были проведены расчеты для сетки моделей атмосфер [3] в диапазоне параметров: $T_{эф} = 4000–9000$ K (с шагом 250 K), $\lg g = 0.0–4.5$ (с шагом 0.5), и трех значений содержаний тяжелых элементов $[A] = 0.0; -1.0; -2.0$. Расчеты показывают, что для Al I имеет место явление "сверхионизации". Основное состояние $3p$ Al I недонаселено в области формирования спектральных линий. Механизм недонаселения связан с преобладанием радиативной ионизации с основного уровня над каскадными переходами с высоковозбужденных уровней, причиной которого является большое значение сечения ионизации основного состояния $3p$.

На рис. 2, *a* и 2, *b* представлено поведение b-факторов отдельных уровней Al I с глубиной для моделей звезд с различными эффективными температурами и металличностью.[1] Наиболее важным представляется рассмотрение поведения b-факторов уровней $3p$ – основного состояния атома Al I.

[1] b-фактор – величина, характеризующая отклонение населенностей уровней от равновесных, вычисляемых по формулам Больцмана–Саха: $b_i = \dfrac{n_{i\ \mathrm{NLTE}}}{n_{i\ \mathrm{LTE}}}$.

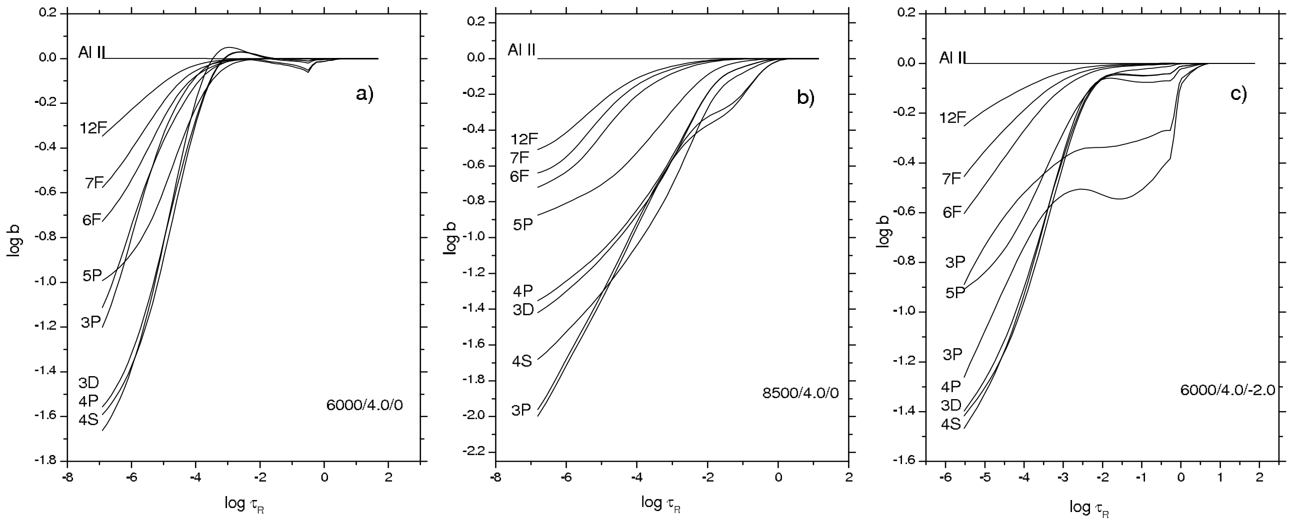

Рис. 2. Поведение b-факторов уровней Al I для моделей атмосфер с различными эффективными температурами и металличностью

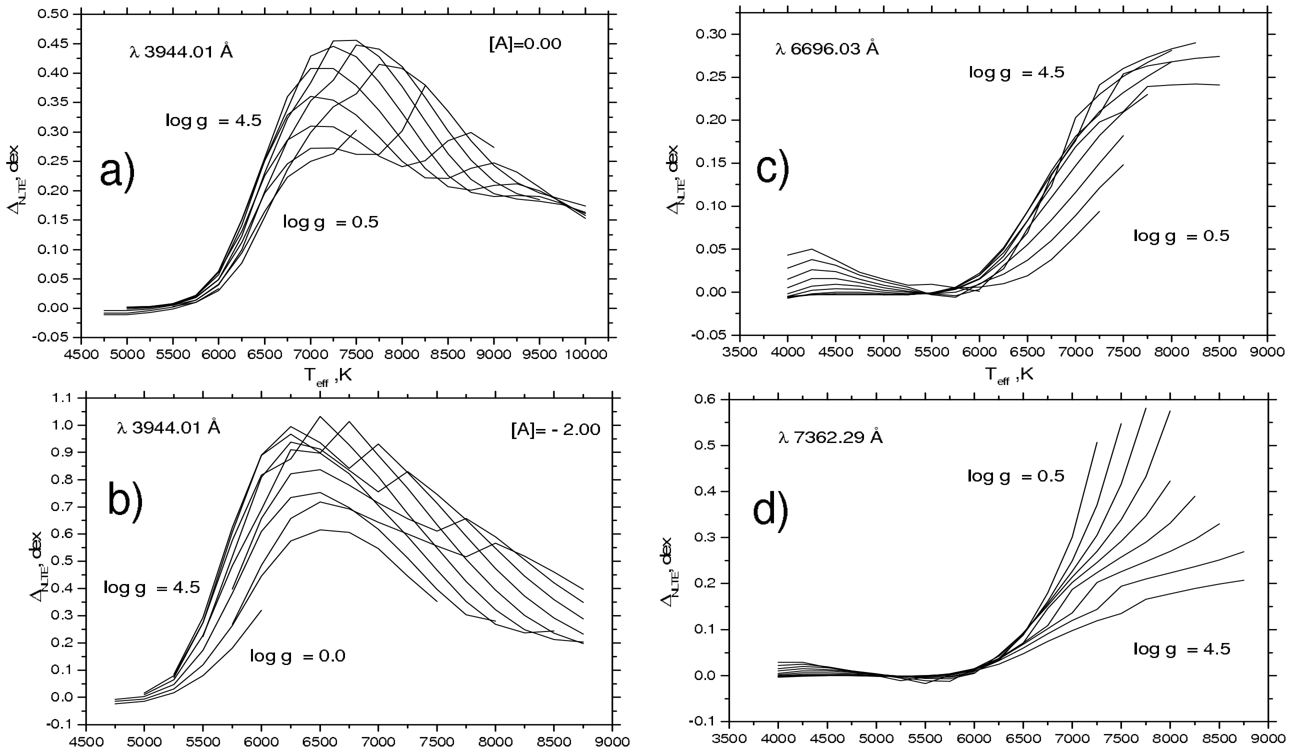

Рис. 3. НеЛТР-поправки к содержанию Al I для резонансных линий и различной металличности (*a* и *b*); не-ЛТР-поправки к содержанию Al I для субординатных линий для звезд с солнечным содержанием тяжелых элементов (*c* и *d*)

Так как b-факторы всех уровней меньше 1, то происходит уменьшение по сравнению с ЛТР-коэффициентами поглощения в линиях. Для оптического излучения функция источников в линии S_ν становится больше функции Планка, т. е. линии Al I будут ослаблены по сравнению с ЛТР. Следовательно, неЛТР-поправки к содержанию Al должны быть положительными.

Аналогичная картина наблюдается и для случая малой металличности (рис. 2, *c*), эффект "сверхионизации" при этом выражен ещё больше.

Для рассматриваемых линий Al I вычислены неЛТР-поправки к содержанию Al, определенного в предположении ЛТР: $\Delta X_{\rm NLTE} = \lg \varepsilon_{\rm NLTE} - \lg \varepsilon_{\rm LTE}$.

На рис. 3, *a* и 3, *b* представлены поправки для двух линий для моделей атмосфер с солнечным содержанием тяжелых элементов. Из представленного рисунка видно, что данные поправки несущественны для звезд классов F–K и возрастают для звезд с более высокими эффективными температурами (при этом поправки слабо зависят от $\lg g$). Из сравнения величины неЛТР-поправок для звезд разной металличности следует, что поправки возрастают с уменьшением металличности (рис. 3, *c* и 3, *d*).

Следует отметить, что при малой металличности ($[A] < 0.0$) неЛТР-поправки для резонансных линий $\lambda = 3944.01$ Å и $\lambda = 3962.52$ Å нужно учитывать в любом случае.

Проведенные расчеты для Al I, выполненные в достаточно широком диапазоне звездных параметров, и анализ линий Al I в спектре Солнца позволяют сделать следующие выводы.

1. Согласование наблюдаемых и теоретических профилей линий в спектре Солнца позволяет уточнить ряд атомных параметров (в частности, постоянные ван-дер-ваальсовского уширения C_6).
2. Для Al I имеет место явление "сверхионизации". Уровень $3p$ недонаселен в области формирования спектральных линий. Механизм недонаселения связан с преобладанием радиативной ионизации с основного уровня над каскадными переходами с высоковозбужденных уровней, причиной которого является большое значение сечения ионизации основного состояния $3p$.
3. НеЛТР-поправки к содержанию Al несущественны для звезд спектральных классов F–K, но резко возрастают с ростом температуры ($T_{\text{эф}} > 6000$ K) и уменьшением металличности.
4. Рассчитаны сетки неЛТР-поправок к содержанию Al, определенного в предположении ЛТР ($\Delta X_{\rm NLTE} = \lg \varepsilon_{\rm NLTE} - \lg \varepsilon_{\rm LTE}$), для некоторых линий.

Работа поддержана грантом Ведущих научных школ РФ НШ-4224.2008.2

[1] *Сахибуллин Н. А.* // Труды Казанск. гор. астрон. обсерв. – 1983. – **48**. – С. 9.

[2] *Auer L. H., Heasley J.* // Astrophys. J. – 1976. – **205**. – P. 165.

[3] *Kurucz R. L., Furenlid I., Brault J., Testerman L.* Solar Flux Atlas from 296 to 1300 nm // Solar Obs., Sunspot, New Mexico, 1984.

[4] *Павленко Я. В.* Диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук. – Киев, 1996.

[5] *Ivanova D. V., Shimansky V. V.* // Odessa Astron. Publ. – 1996.– **9**.– P. 66.

[6] *Mashonkina L. I., Shimanskaya N. N., Shimansky V. V.* // Odessa Astron. Publ. – 1996. – **9**. – P. 78.

[7] *Seaton M. J., Zeippen C. J., Tully J. A., et al.* // Rev. Mex. Astron. Astrofis. – 1992. –**23**. – P. 19.

[8] *Kurucz R. L.* SAO CD-ROMs. – Cambridge. MA02138. USA, 1994.

[9] *Unsold A.* Physik der Sternatmospheren. – 2nd ed. – Berlin–Gottingen–Heidelberg: Springer, 1955.

[10] *Иванова Д. В., Шиманский В. В.* // Астрон. журн. – 2000. – **77**. – С. 376.

[11] *Машонкина Л. И., Шиманский В. В., Сахибуллин Н. А.* // Астрон. журн. – 2000. – **77**. – С. 893.

[12] *Шиманская Н. Н., Машонкина Л. И.* // Астрон. журн. – 2001. – **78**. – С. 122.