

ВЛИЯНИЕ ОТКЛОНЕНИЙ ОТ ЛТР НА ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ СЕРЫ У ЗВЕЗД СПЕКТРАЛЬНЫХ ТИПОВ А–К

© 2024 г. С. А. Коротин*, К. О. Киселев

Крымская астрофизическая обсерватория Российской академии наук,
Научный, Республика Крым, Россия

*E-mail: serkor1@mail.ru

Поступила в редакцию 22.06.2024 г.

После доработки 08.07.2024 г.

Принята в печать 18.07.2024 г.

Рассмотрено влияние отклонений от локального термодинамического равновесия на линии нейтральной серы. Предложена сетка поправок для учета влияния отклонений от ЛТР для линий нейтральной серы в видимой и инфракрасной области спектра, включая H -диапазон. Сетка рассчитана с использованием модели атома серы, включающей наиболее современные атомные данные об ударных скоростях с электронами и водородом. Включение в детальное рассмотрение в модель атома уровней и переходов ионизированной серы позволило расширить диапазон эффективных температур звездных фотосфер в сетке до 10000 К. Модель атома была протестирована при определении содержания серы у 13 звезд и показала свою адекватность в широком диапазоне фундаментальных звездных параметров. В спектрах всех тестовых звезд линии серы описываются близким содержанием элемента вне зависимости от степени влияния эффектов отклонения от ЛТР на конкретную спектральную линию. Для линий нескольких мультиплетов были уточнены длины волн и величины сил осцилляторов. Создан список линий S I, рекомендуемый для определения содержания серы.

Ключевые слова: формирование линий, профили линий звезд, содержания элементов на Солнце

DOI: 10.31857/S0004629924120033 EDN: ICTJRV

1. ВВЕДЕНИЕ

Для понимания процессов химической эволюции Галактики и истории звездообразования исследователи рассматривают соотношения между различными химическими элементами в звездных атмосферах. Элементы железного пика и α -элементы играют фундаментальную роль в этих задачах, поскольку их нуклеосинтез происходит в разных масштабах времени. α -элементы можно использовать в качестве космических часов, чтобы контролировать как звездный нуклеосинтез, так и историю формирования галактик. В отличие от других α -элементов, сера умеренно летучая. По этой причине ее содержание, измеренное у звезд в галактиках Местной группы, можно напрямую сравнить с его содержанием, измеренным во внегалактических областях H II. В то время как α -элементы производятся сверхновыми II типа, элементы железного пика производятся сверхновыми типа Ia на более длительных масштабах времени. Среди различных α -элементов нуклеосинтез серы до конца не изучен. Серы образуется на заключительном этапе эволюции массивных звезд ($M > 20 M_{\odot}$). Гидростатическое горение неона при температуре ядра 1.2×10^9 К приводит к образованию конвективного ядра кислорода

и образованию α -элементов до серы включительно. Потом происходят разнообразные процессы ядерных превращений, в результате которых наработанная сера почти полностью уничтожается во время фазы горения Si. Однако производство S продолжается при горении кислорода в верхних слоях оболочки вокруг ядра, а также производится взрывным горением кислорода при взрыве сверхновых II типа [1, 2]. Предполагается, что такое обогащение имеет достаточно короткую характерную шкалу времен — порядка нескольких десятков миллионов лет. Соответственно, можно ожидать, что соотношение [S/Fe] будет относительно постоянным для звезд пониженной металличности. Это те звезды, что образовались до зажигания первых сверхновых типа Ia. Затем это соотношение будет уменьшаться в соответствии с увеличением количества железа. До сих пор нет единого мнения о том, есть ли такое «плато» в относительном содержании серы у звезд с дефицитом металлов. Авторы [3] считали, что при $[Fe/H] < 2.0$ продолжается рост соотношения [S/Fe]. В ряде других работ [4, 5] и др. показано, что некое «плато» наблюдается. Однако это плато обладает большой дисперсией из-за сложностей анализа слабых линий при такой низкой металличности.

При этом для звезд с околосолнечным содержанием тяжелых элементов сера себя ведет как типичный α -элемент. В диапазоне $-1 < [\text{Fe}/\text{H}] < 0$ соотношение $[\text{S}/\text{Fe}]$ снижается до нуля, что подтверждает общий характер нуклеосинтеза α -элементов.

Однако сере уделяется мало внимания исследователями. Анализ серы часто пропускают в пользу других α -элементов, измерение которых менее сложно. Проблемы, о которых идет речь, это слабость оптических линий серы. В оптическом диапазоне есть 6, 8 и 10 мультиплеты с относительно слабыми линиями, которые практически исчезают у звезд с дефицитом металлов. Два триплета в ближней инфракрасной области, $\lambda 9212 - 9237 \text{ \AA}$ и $\lambda 10455 - 10459 \text{ \AA}$ испытывают сильное влияние эффектов отклонения от термодинамического равновесия (ЛТР) [6, 7]. Эти линии расположены в области спектра, сильно искаженной линиями земной атмосферы. По этим причинам изучение серы часто опускается в пользу более простого анализа других α -элементов. В результате наши знания о поведении серы все еще недостаточны по сравнению с другими α -элементами.

Влияние на линии серы не-ЛТР эффектов требует детального изучения. Как показано в работах [6, 7] не-ЛТР поправки линий S I имеют сложные зависимости от фундаментальных параметров звезд и собственно содержания серы. Модельные расчеты [6, 7] показывают сходный характер поведения не-ЛТР поправок от звездных параметров, хотя и несколько разнятся между собой по величине поправок. Следует отметить, что с момента проведения упомянутых модельных расчетов появились новые атомные данные, касающиеся нейтральной и ионизованной серы. Использование новых детальных квантовомеханических расчетов величин неупругих столкновений с электронами и водородом должно помочь избежать возможных ошибок, вносимых приближенными формулами. Нами была проведена работа по модернизации модели атома серы [7] с учетом самых современных атомных данных и ее проверка по спектрам хорошо изученных звезд.

2. МОДЕЛЬ АТОМА СЕРЫ

Созданная нами ранее модель атома серы [7] включала в себя 64 уровня нейтральной серы и основной уровень S II. При этом для учета ударного взаимодействия с электронами и водородом применялись аппроксимационные формулы, имеющие зачастую невысокую точность. За прошедшее время наше знание об атомных параметрах серы значительно улучшилось. Появились детальные квантово-

механические расчеты ударных скоростей для неупругих взаимодействий 56 уровней нейтральной серы с водородом [8]. Ранее в атомной модели для учета столкновений с водородом использовалась так называемая «формула Дравина» [9, 10]. Хорошо известно, что эта формула дает очень неточные результаты, которые исследователи пытались корректировать, вводя поправочные множители, получаемые эмпирически путем подгонки не-ЛТР расчетов к наблюдениям. Сравнение этой аппроксимационной формулы с детальными расчетами [8] показали, что отличия могут достигать нескольких порядков. Аналогичная ситуация сложилась с ударными скоростями с электронами. В базе данных ADAS [11] стали доступны детальные расчеты ударных взаимодействий для 17 нижних уровней серы со свободными электронами, что позволяет отказаться от применения неточных приближенных формул. Кроме того, применение старой модели атома к исследованию линий серы у A-звезд с достаточно высокими эффективными температурами поставило вопрос о включении в модель атома дополнительных уровней S II и S III. Все это заставило нас провести модернизацию модели атома и соответствующее тестирование.

Как и в предыдущей модели, в детальное рассмотрение вошли населенности 64 энергетических уровней нейтральной серы. Верхний уровень S I в модели отстоит от континуума на 0.21 эВ, что будет обеспечивать надежное их взаимодействие при температурах выше 2500 К. Также были добавлены 81 уровень S II и основной уровень S III. Верхний уровень S II при этом отстоит от континуума на 0.45 эВ, что соответствует температуре 5150 К. Кроме того, для более полного учета числа частиц, были включены один уровень S I, шесть уровней S III и основной уровень S VI с населенностями, рассчитанными в ЛТР. Тонкая структура уровней не учитывалась. Значения энергий электронных уровней были взяты из работы [12]. Схема уровней атома серы приведена на рис. 1.

Детально рассматривались 775 связанных и 146 связанных-свободных переходов между уровнями. Профили линий рассчитывались в приближении Фойгта с учетом радиативного уширения, а также уширений Штарка и Ван-дер-Ваальса. Число точек по профилю варьировалось от 30 до 110, в зависимости от интенсивности линии. Сечения фотоионизации и силы осцилляторов брались из базы данных TOPBase [13]. Для запрещенных переходов силы осцилляторов брались из каталога [14].

Детальные квантовомеханические расчеты скоростей ударного возбуждения электронами для пе-

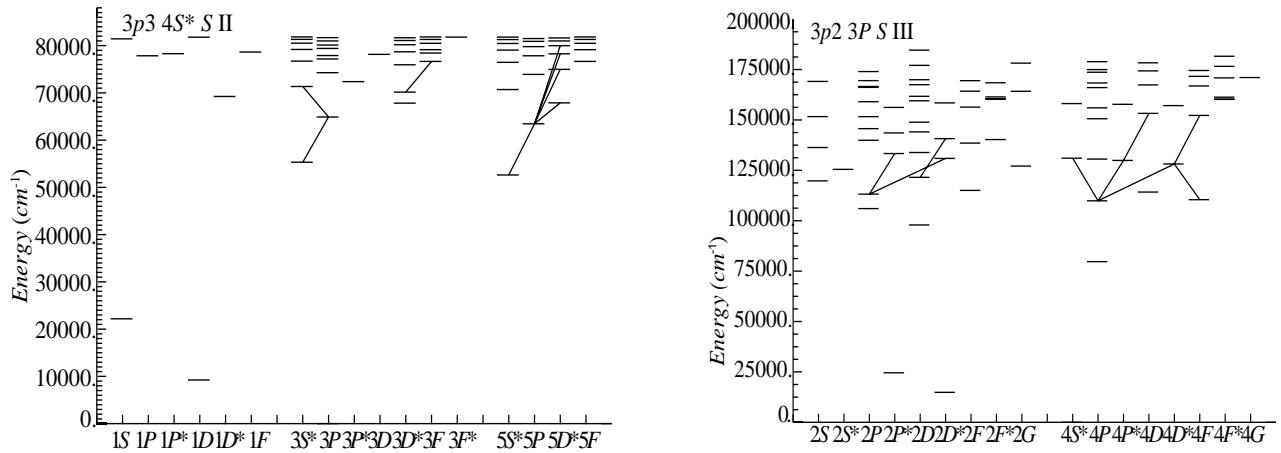


Рис. 1. Диаграммы Гротриана для S I (слева) и S II (справа). Указаны только переходы, используемые для определения содержания серы.

переходов между 17 уровнями нейтральной серы были взяты из базы данных ADAS [11]. Для переходов между нижними 32 уровнями ионизированной серы использовались расчеты из работы [15]. Для остальных разрешенных переходов применялась формула из работы [16], для запрещенных переходов – формула из [17] с эффективной силой столкновения, принятой равной 1, а ударная ионизация учитывалась по формуле из [18] со значением сечения на пороге фотоионизации из TOPBase [13].

Ударное взаимодействие с атомами водорода становится очень важным в атмосферах звезд с низкой эффективной температурой и у звезд пониженной металличности, где уменьшается концентрация электронов. Несмотря на то, что собственно величины ударных скоростей с водородом достаточно малы, высокая концентрация водорода при этом обеспечивает значимое влияние на перераспределение населенностей электронных уровней. Появившиеся в последние годы детальные квантово-механические расчеты неупругих столкновений между различными атомами и водородом позволяют учесть это влияние более реалистично, чем при использовании приближенных подходов. Для атома серы такие расчеты были выполнены в работе [8]. Нами было включено в модель ударное взаимодействие с водородом для четырех десятков уровней нейтральной серы в диапазоне температур от 1000 до 10000 К. Вне этого диапазона применялась экстраполяция, однако при таких высоких температурах влияние ударного взаимодействия с водородом становится незначительным.

Для получения населенностей уровней серы в звездных атмосферах применялся программный

комплекс MULTI [19] версии 2.3, несколько модифицированный нами [20]. Основные изменения касаются использования полного пакета расчета не-прозрачностей из программы ATLAS9 [21], включая так называемые массивы «opacity distribution function» (ODF). После совместного решения уравнений статистического равновесия и уравнений переноса получались коэффициенты отклонения населенностей уровней от ЛТР, так называемые b -факторы: отношение не-ЛТР населенностей к населенностям в ЛТР ($N_{\text{NLTE}}/N_{\text{LTE}}$). Они передавались в программу расчета синтетического спектра SynthV [22], в которой рассчитывались профили линий серы с учетом не-ЛТР эффектов, в то время как линии других элементов рассчитывались при ЛТР подходе. Параметры линий, необходимых для расчета синтетического спектра, брались из базы данных VALD [23].

3. ПРИМЕНЕНИЕ МОДЕЛИ АТОМА СЕРЫ К ИССЛЕДОВАНИЮ СПЕКТРА СОЛНЦА. УТОЧНЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЛИНИЙ НЕЙТРАЛЬНОЙ СЕРЫ

После модификации модели атома необходимо проверить корректность ее работы. Для проверки подобранный модели необходимо провести сравнение с наблюдаемыми спектрами нескольких звезд, параметры атмосфер которых хорошо известны. Атмосферные параметры наблюдаемых звезд должны охватывать широкий диапазон температур и давлений. Проверка модели происходит путем сравнения наблюдаемых и синтетических профилей спектральных линий, которые принадлежат различным мультиплетам и, соответственно, демонстрируют разную степень отклонения от значений, предсказанных в ЛТР приближении. Например, если есть спектральные линии,

которые не проявляют заметных не-ЛТР эффектов, и линии, которые демонстрируют значительные отклонения от ЛТР. В рамках ЛТР такая совокупность линий не может быть корректно описана путем варьирования содержания элемента. Надлежащим образом выбранная модель атома при не-ЛТР расчетах должна позволять удовлетворительно описывать такой спектр, используя близкие значение содержания элемента для всех исследуемых линий.

Для определения содержания серы в видимой области спектра пригодны небольшое число линий S I: это первый ($\lambda 9212 - 9237 \text{ \AA}$), шестой ($\lambda 8694 \text{ \AA}$), восьмой ($\lambda 6743 - 6757 \text{ \AA}$) и десятый ($\lambda 6046 - \lambda 6052 \text{ \AA}$) мультиплеты квинтетной системы уровней. В недалеком ИК-диапазоне можно использовать линии мультиплетов: $\lambda 10455 - 10459 \text{ \AA}$, $\lambda 15400 - 15422 \text{ \AA}$, $\lambda 15469 - 15478 \text{ \AA}$ и $\lambda 22507 - 22707 \text{ \AA}$. Остальные линии слабы либо бледированы. Стоит отметить, что восьмой и десятый мультиплеты каждый состоят из трех линий, каждая из которых, в свою очередь, представляет наложение трех компонентов с небольшим сдвигом по длине волн. Профиль такой линии далек от гауссианы и требует расчета синтетического спектра для сравнения с наблюдаемым, что хорошо видно на приведенных ниже рисунках. Использование эквивалентных ширин для этих линий требует осторожности и применения методов расчета эквивалентных ширин многокомпонентных линий.

Мы использовали для анализа линий нейтральной серы спектр Солнца из атласов [24, 25]. Первый покрывает диапазон от $\lambda 3000$ до $\lambda 13000 \text{ \AA}$, а второй от $\lambda 4050$ до $\lambda 23000 \text{ \AA}$. Для проведения расчетов бралась модель атмосферы Солнца [21] с микротурбулентной скоростью 1 км/с. Скорость вращения Солнца принималась равной 1.8 км/с. Содержание химических элементов в атмосфере

Солнца принималось согласно работе [26]. Для всех линий при расчете профилей учитывалось уширение Ван-дер-Ваальса, рассчитанное согласно [27, 28].

Расчеты населенностей уровней нейтральной серы для фотосферы Солнца показали результаты сходные с расчетами из работы [7]. Линии шестого, восьмого и десятого мультиплетов образуются практически в ЛТР и не испытывают влияния не-ЛТР эффектов. Аналогично ведут себя линии в инфракрасном *H*-диапазоне. Только линии двух ИК-триплетов $\lambda 9212 - 9237 \text{ \AA}$ и $\lambda 10455 - 10459 \text{ \AA}$ значительно усиливаются из-за перенаселенности их нижних уровней, $4s\ 5S^*$ и $4s\ 3S^*$, и заниженной населенности их верхних уровней, $4p\ 5P$ и $4p\ 3P$ соответственно, на глубинах формирования. Распределение *b*-факторов некоторых уровней серы по глубине фотосферы представлено на левой панели рис. 2. Видно, что населенности уровней, между которыми образуются переходы шестого, восьмого и десятого мультиплетов, находятся в ЛТР на глубинах образования этих линий. На правой панели рис. 2 представлено изменение отношения функции источника S_i в линии к функции Планка B_ν в зависимости от оптической глубины для обоих ИК-триплетов. Видно, что на глубинах формирования линий величина $S_i/B_\nu < 1$. Соответственно не-ЛТР эффекты приводят к усилению линий и поправки к оценкам содержания серы при ЛТР подходе будут отрицательными для линий этих мультиплетов.

Экспериментально силы осцилляторов и длины волн определены только для линий триплета $\lambda 10455 - 10459 \text{ \AA}$ [29]. Для остальных линий серы существуют только теоретические расчеты, в частности [30] (далее BQZ). Более современные результаты приведены в работе [31] (далее ZB). Работы же [32] (да-

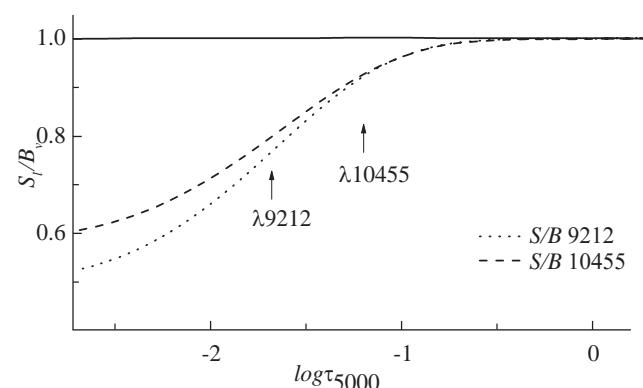
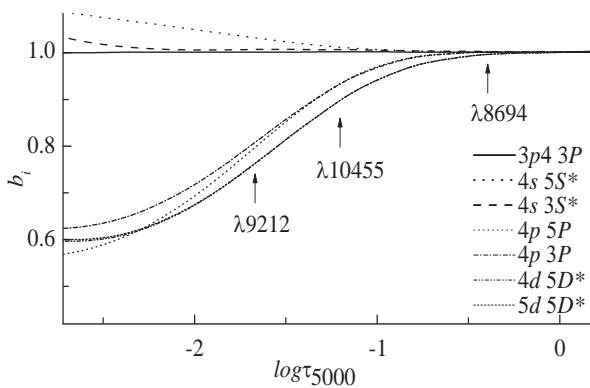


Рис. 2. Распределение *b*-факторов в атмосфере Солнца (левая панель) и изменение с глубиной отношения S_i/B_ν для двух ИК-триплетов (правая панель). Стрелками обозначены глубины образования некоторых линий серы.

лее FTI) и [33] (далее DH) охватывают только часть рассматриваемых нами линий S I.

Силы осцилляторов для линий первого мультиплета практически совпадают в работах ZB, FTI и DH: разница не превышает 0.03 dex, при заявленной точности в 25%. В своих дальнейших расчетах мы использовали для этих линий данные из ZB.

На рис. 3 приведены сравнение рассчитанных профилей линий серы двух ИК-триплетов с учетом не-ЛТР эффектов с наблюдаемым спектром Солнца. Все линии, кроме $\lambda 9212 \text{ \AA}$, искаженной земной атмосферой, прекрасно описываются при содержании серы ($S/H = 7.16$), при ошибке подгонки профилей не выше ± 0.02 dex. Величина не-ЛТР поправок для линий первого ИК-триплета ($\lambda 9212 - 9237 \text{ \AA}$) составляет -0.23 dex, а для линии $\lambda 10456 \text{ \AA}$ не-ЛТР поправка -0.18 dex. Полученное обилие серы совпадает с содержанием серы в хондритах: (S/H) = 7.15 ± 0.02 [34]. Обилие серы в этих метеоритах, определенное с очень высокой точностью, может быть использовано как базовое для Солнечной системы. Так как Солнце звезда-карлик и находится на Главной последовательности, то ее фотосфера сохранила свой первоначальный состав, и содержание серы в ней должно совпадать с метеоритным. Согласие содержания элемента, полученного по ИК-триплетам, с метеоритным может служить одним из подтверждений адекватности нашей модели атома серы.

Работа с остальными линиями серы в оптическом диапазоне показала, что если использовать для расчета синтетического спектра длины волн и силы осцилляторов из баз данных VALD [23] или NIST [35], то идеально описать линии не удается. Это вполне объяснимо, так как точность расчета сил осцилляторов колеблется от 25 до 40% у разных авторов

и, например, для линий шестого мультиплета величины $\lg g f$ из ZB и BQZ отличаются на 0.31 dex. При этом длины волн также определяются путем расчетов исходя из энергии электронных уровней, которые, как правило, определены с точностью $\pm 25-30 \text{ cm}^{-1}$ [12]. Исходя из того, что линии S I в оптическом диапазоне не подвержены не-ЛТР эффектам, мы провели уточнение длин волн и сил осцилляторов этих линий. Такая процедура уточнения параметров линий является поиском компромисса между спектральными наблюдениями и теоретическими расчетами длин волн и сил осцилляторов.

Шестой мультиплет – триплет $\lambda 8693 - 8694 \text{ \AA}$. Величины $\lg g f$ этого триплета из BQZ систематически меньше на 0.31 dex, чем из ZB, и меньше на 0.45 dex, чем данные DH. При использовании сил осцилляторов BQZ расчетные профили сильно слабее, чем в наблюдаемом спектре. Величины из ZB приводят к более реалистичному синтетическому спектру, но профили получаются все-таки несколько слабее, чем наблюдаемые. Если же брать силы осцилляторов из DH, расчетные линии слишком сильны. Разница между $\lg g f$ из DH и ZB составляет 0.13 dex для всех компонентов мультиплета. Наилучшее согласие синтетических и наблюдаемых профилей происходит при значениях $\lg g f_{\text{ZB}} + 0.088$. Мы также уточнили длины волн компонентов мультиплета. Сдвиг длины волны не превышает 0.07 \AA от приведенных в VALD, что лежит в пределах указанной выше точности определения длин волн.

Восьмой мультиплет – триплет $\lambda 6743 - 6757 \text{ \AA}$. Каждый из компонентов данного триплета представляет из себя триплет из близко расположенных линий. Величины $\lg g f$ этих девяти линий из BQZ в среднем систематически меньше на 0.11 dex, чем

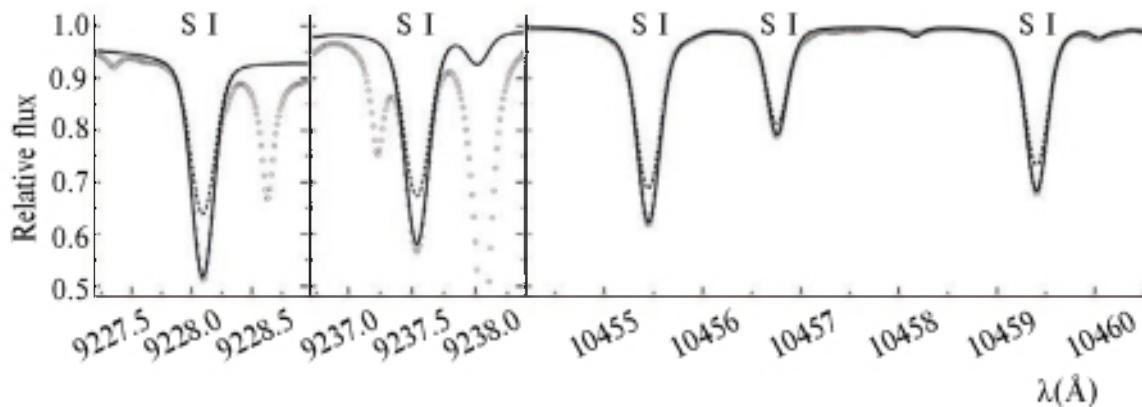


Рис. 3. Сравнение наблюдаемых (кружки) и синтетических профилей линий ИК-триплетов в спектре Солнца. Не-ЛТР профиль для содержания серы ($S/H = 7.16$) показан сплошной линией, штриховой – ЛТР профиль, рассчитанный с тем же содержанием.

из ZB. У DH расчетов для этого мультиплета нет. При использовании сил осцилляторов BQZ с метеоритным содержанием серы теоретические линии слабее наблюдаемых, а с данными ZB — слегка завышены. Наилучшее согласие достигается при величинах $\lg g f_{\text{ZB}} + 0.075$, что близко к значениям BQZ, но несколько меньше них. Стоит отметить, длины волн компонентов этого мультиплета у разных авторов отличаются до 0.1 Å. Сам мультиплет представляет из себя комбинацию переходов между тремя нижними уровнями и пятью верхними. Энергии нижних уровней определены достаточно точно. В частности, это верхние уровни линий первого мультиплета λ9212 – 9237 Å. Мы попытались, варьируя энергию верхних уровней, добиться наилучшего описания наблюдаемых профилей. Коррекция энергий не превышала 25 cm⁻¹. При этом максимальный сдвиг линий относительно рекомендованных в VALD составил 0.06 Å, что лежит в пределах разброса значений из разных литературных источников.

Десятый мультиплет — триплет λ6041 – 6052 Å. Каждый из компонентов данного триплета также представляет из себя триплет из близко расположенных линий. Линия λ6041 Å бланкирована сильной линией железа и выпадает из анализа. У DH и BQZ расчетов для этого мультиплета нет, а величины $\lg g f$, приведенные в VALD, меньше данных ZB в среднем на 0.15 dex. Профили, рассчитанные с этими силами осцилляторов, слабее наблюдаемых. Удовлетворительного описания линии λ6052 Å удается добиться, если увеличить $\lg g f_{\text{ZB}}$ всех компонентов этого триплета на 0.113 dex. При этом нами были откорректированы длины волн двух компонентов линии с максимальным сдвигом в 0.03 Å. Однако такое изменение сил осцилляторов для линии

λ6046 Å не дает адекватного описания наблюдаемого спектра. В спектре Солнца эта линия явно уширена неизвестным компонентом. В дальнейшем мы исключили данную линию из анализа.

На рис. 4 приведены примеры описания синтетическими профилями с уточненными параметрами наблюдаемого солнечного спектра. Уточненные параметры линий приведены в табл. 1.

4. СРАВНЕНИЕ НЕ-ЛТР РАСЧЕТОВ С НАБЛЮДАЕМЫМИ СПЕКТРАМИ ЗВЕЗД

4.1. Звезды поздних спектральных типов

После уточнения параметров линий S I по спектру Солнца, нами было проведено тестирование модели атома по спектрам звезд поздних спектральных типов. Для этого были выбраны хорошо исследованные звезды с надежно определенными фундаментальными параметрами. При достоверно работающей модели атома линии разных мультиплетов должны описываться близким содержанием серы в широком диапазоне параметров атмосферы звезды. В исследование вошли следующие объекты. Три звезды с околосолнечным химическим составом: горячий карлик Процион, горячий гигант HD195295 и холодный гигант Поллукс. Две звезды с пониженной металличностью: τ Кита и HD22879, а также звезда с дефицитом металлов HD84937. Таким образом, звезды, используемые в анализе, сильно отличаются между собой. Звезды отбирались с низкой скоростью вращения, чтобы профили были минимально искажены.

Фундаментальные параметры были взяты из работы [36] для всех звезд кроме HD195295, для которой данные брались из работы [37]. Спектры для

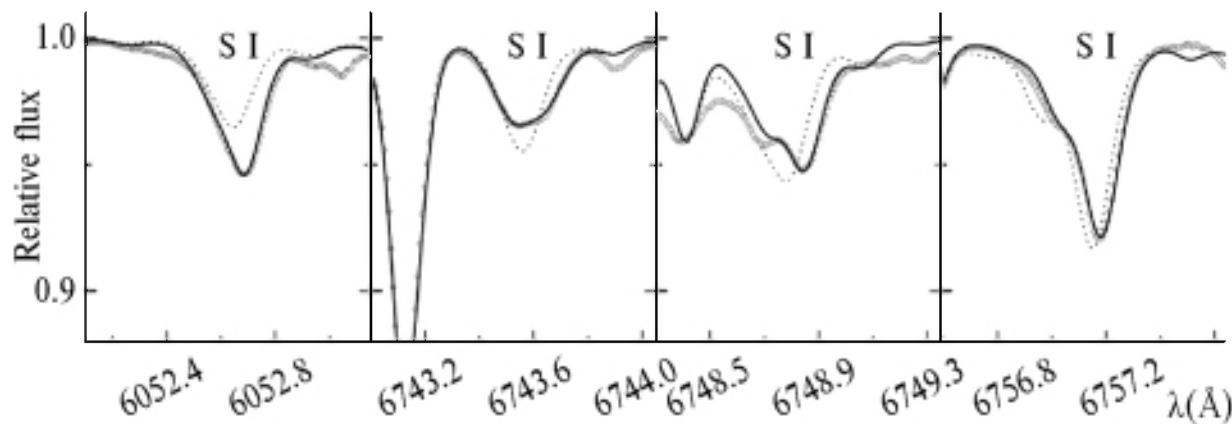


Рис. 4. Сравнение наблюдаемых (кружки) и синтетических профилей линий восьмого и десятого мультиплетов в спектре Солнца. Профили с уточненными параметрами показаны сплошной линией, пунктирной — профили, рассчитанные с параметрами из VALD.

Таблица 1. Параметры линий S I

λ , Å	E, эВ	$\lg gf$	Γ_{vw}	λ , Å	E, эВ	$\lg gf$	Γ_{vw}
6052.53	7.87	-1.99	-6.55	10 455.45	6.86	0.25	-7.32
6052.59	7.87	-1.15	-6.55	10 456.76	6.86	-0.45	-7.32
6052.69	7.87	-0.56	-6.55	10 459.41	6.86	0.03	-7.32
6743.47	7.87	-1.24	-6.65	15 400.08	8.70	0.43	-7.00
6743.54	7.87	-0.88	-6.65	15 403.72	8.70	-0.30	-7.00
6743.65	7.87	-0.94	-6.65	15 403.79	8.70	0.61	-7.00
6748.61	7.87	-1.36	-6.65	15 422.20	8.70	-1.84	-7.00
6748.71	7.87	-0.77	-6.65	15 422.26	8.70	-0.30	-7.00
6748.85	7.87	-0.56	-6.65	15 422.28	8.70	0.77	-7.00
6756.86	7.87	-1.71	-6.65	15 469.82	8.05	-0.17	-6.90
6757.03	7.87	-0.86	-6.65	15 478.48	8.05	0.06	-6.90
6757.18	7.87	-0.28	-6.65	22 507.56	7.87	-0.48	-7.44
8693.16	7.87	-1.29	-6.98	22 519.07	7.87	-0.25	-7.44
8693.95	7.87	-0.45	-6.98	22 552.57	7.87	-0.04	-7.44
8694.64	7.87	0.14	-6.98	22 563.83	7.87	-0.26	-7.44
9212.87	6.53	0.39	-7.37	22 575.39	7.87	-0.73	-7.44
9228.09	6.53	0.25	-7.37	22 644.06	7.87	-0.34	-7.44
9237.54	6.53	0.02	-7.37	22 707.74	7.87	0.44	-7.44

этой звезды были получены на спектрографе 2.7-м телескопа обсерватории МакДональд [38] с разрешением $R = 60000$. Спектры остальных объектов, полученные на спектрографе UVES Паанальской обсерватории [39], взяты из архива ESO. Они все имеют спектральное разрешение не ниже 75000 и отношением сигнал/шум не ниже 200. Обработка спектров и проведение континуума проводилась с использованием пакета Dech [40]. Модели атмосфер исследуемых звезд были рассчитаны по программе ATLAS9 с использованием ODF из работы [41]. Параметры исследуемых звезд даны в табл. 2. Там же приведены результаты определения содержания серы для используемых в анализе мультиплетов (по одной линии на каждый мультиплет) и соответствующие не-ЛТР поправки. Содержания, получаемые по линиям внутри мультиплета, практически не отличаются между собой. Приведенная ошибка среднего содержания, отражающая разброс от линии к линии, показывает очень маленький разброс. Реальная ошибка определения содержания элемента будет несколько выше, так как должна включать влияние неточности фундаментальных параметров звезды.

ИК-триплет $\lambda 10455 - 10459$ Å, к сожалению, удалось использовать только для Проциона, Пол-

лукса и HD195295, так как на других спектрограммах этот диапазон имел очень большие шумы либо не попадал в наблюдаемую область. У Поллукса и τ Кита линия $\lambda 6052$ Å сильно блендируется молекулярными линиями CN, а у HD84937 очень слаба и поэтому исключена из анализа. У HD84937 линии восьмого мультиплета также практически не видны: эквивалентные ширины линий менее 1 mÅ. Однако на месте линии $\lambda 6757$ Å наблюдается хорошо заметная депрессия, которая неплохо описывается содержанием серы, полученным по линиям первого и шестого мультиплетов. Это можно рассматривать как дополнительное подтверждение верности полученного обилия серы. Примеры сравнения синтетических и наблюдавшихся профилей приведены на рис. 5. Видно, что несмотря на то, что линии разных мультиплетов по-разному реагируют на эффекты отклонения от ЛТР в зависимости от параметров звездных атмосфер, все они показывают близкое между собой содержание серы. Это можно рассматривать, как хорошее подтверждение адекватности используемой модели атома.

Таблица 2. Содержание серы в исследуемых звездах

Star	Параметры звезд					Содержание серы (S/H)					N1
	T_{eff}	$\lg g$	[Fe/H]	V_t	$V \sin i$	6052	6757	8694	9212	10 455	
Процион	6554	3.99	0.01	1.66	2.8	7.10	7.11	7.15	7.13	7.13	12
HD195295	6570	2.32	0.00	3.60	8.0	7.02	7.07	7.06	7.08	7.08	10
Поллукс	4858	2.90	0.13	1.28	2.0		7.20	7.25	7.15	7.10	6
τ Кита	5414	4.49	-0.49	0.89	0.4		6.74	6.67	6.67		6
HD 22879	5868	4.27	-0.86	1.05	4.4	6.56	6.56	6.53	6.50		6
HD 84937	6356	4.15	-2.03	1.39	5.2		5.40?	5.36	5.34		4
α Peg	9597	3.80	0.25	1.98	5.4	7.48	7.53	7.56	7.62	7.52	11
θ Vir	9600	3.60	0.15	1.42	0.5	7.40	7.46	7.44	7.44		7
HD 24040	5809	4.12	0.09	1.00	1.5	7.23	7.21	7.19	7.17	7.20	12
HD 28005	5802	4.18	0.21	1.00	3.5	7.34	7.35	7.34	7.36	7.36	10
HD 34445	5803	4.06	-0.03	1.00	4.5	7.23	7.25	7.22	7.18	7.18	12
HD 82943	5917	4.23	0.13	1.00	4.0	7.32	7.34	7.32	7.32	7.32	9
HD 87359	5645	4.40	-0.07	1.00	4.0	7.14	7.18	7.14	7.14	7.16	10

Star	Среднее (S/H)		не-ЛТР поправки, dex				
	Опт. диапазон	H -диапазон	6052	6757	8694	9212	10 455
Процион	7.12 ± 0.02		-0.02	-0.02	-0.06	-0.48	-0.51
HD195295	7.08 ± 0.04		-0.06	-0.08	-0.21	-0.81	-0.83
Поллукс	7.17 ± 0.05			0.00	-0.02	-0.30	-0.18
τ Кита	6.71 ± 0.04			0.00	0.00	-0.13	
HD 22879	6.54 ± 0.02		0.00	0.01	0.00	-0.19	
HD 84937	5.35 ± 0.03			0.00	0.00	-0.14	
α Peg	7.55 ± 0.05		-0.03	-0.04	-0.07	-0.37	-0.34
θ Vir	7.43 ± 0.03		-0.02	-0.03	-0.06	-0.35	
HD 24040	7.19 ± 0.02	7.26 ± 0.04	0.00	0.00	0.00	-0.20	-0.15
HD 28005	7.35 ± 0.01	7.32 ± 0.03	0.00	0.00	0.00	-0.21	-0.15
HD 34445	7.21 ± 0.02	7.23 ± 0.03	0.00	0.00	0.00	-0.22	-0.16
HD 82943	7.32 ± 0.01	7.30 ± 0.03	0.00	0.00	-0.01	-0.22	-0.15
HD 87359	7.16 ± 0.02	7.15 ± 0.01	0.00	0.00	0.00	-0.17	-0.11

4.2. Линии серы у A-звезд

Следующим этапом проверки нашей модели было применение ее для более горячих звезд, в спектрах которых сера представлена линиями как S I, так и S II. Это A-звезды с температурами выше 9500 K, у которых начинают быть видны линии ионизованной серы, при том, что линии нейтральной серы в видимой области также еще достаточно интенсивны. Мы использовали для анализа две звезды, исследованные в работе [42], α Peg и θ Vir. Это звезды

с температурой 9600 K и $\lg g = 3.8$ и 3.6 соответственно. Спектры были получены на спектрографе ESPaDOnS [43] с разрешением $R = 68000$. Для α Peg проведена процедура усреднения 12 спектрограмм, что позволило повысить отношением сигнал/шум до 700. Детали приведены в работе [42].

Параметры линий ионизованной серы, использованных для анализа, приведены в табл. 3. Силы осцилляторов взяты из работы [44]. Все линии слабые, от 2 до 7 mÅ, но хорошо детектируемы

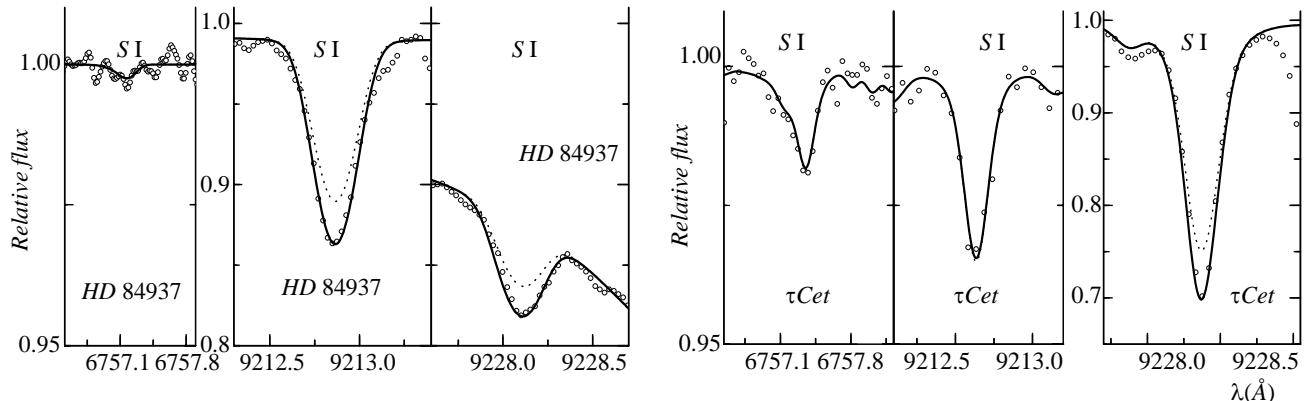


Рис. 5. Сравнение наблюдаемых (кружки) и синтетических профилей линий нейтральной серы в спектрах HD 84937 и τ Кита (τ Cet). Не-ЛТР профиль показан сплошной линией, ЛТР профиль, рассчитанный с тем же содержанием, представлен штриховой линией.

Таблица 3. Параметры линий S II

λ , Å	E_{low}	$lg\ gf$	λ , Å	E_{low}	$lg\ gf$
4162.665	15.94	0.780	5014.042	14.07	0.046
4294.402	16.14	0.560	5032.434	13.67	0.188
4716.271	13.62	-0.365	5428.655	13.58	0.177
4815.552	13.67	0.068	5453.855	13.67	0.442
4925.343	13.58	-0.206	5606.151	13.73	0.124
5009.567	13.62	-0.234	5639.977	14.07	0.258

благодаря высокому качеству спектров. Эти линии образуются глубоко в фотосфере и поэтому практически свободны от влияния не-ЛТР эффектов, которые приводят к очень незначительному (на несколько процентов) их усилению. На рис. 6 приведены примеры сравнения теоретических и наблюдаемых профилей линий серы в двух степенях ионизации.

Результаты не-ЛТР расчетов для линий нейтральной серы у исследуемых A-звезд приведены в табл. 2. По линиям S II было получено не-ЛТР содержание серы (S/H) = 7.51 ± 0.04 и 7.38 ± 0.04 для α Peg и θ Vir соответственно. Видно, что эти величины отличаются от среднего содержания, полученного по линиям S I, всего на 0.04 dex. Это меньше, чем возможное влияние неточностей в силах осцилляторов и фундаментальных параметров звезд. Таким образом, можно говорить о том, что модель атома серы может использоваться вплоть до эффективных температур в 10000 K.

5. ЛИНИИ НЕЙТРАЛЬНОЙ СЕРЫ В ИНФРАКРАСНОМ H-ДИАПАЗОНЕ

В последнее время расширяются спектральные исследования в H-диапазоне. Появившиеся ИК-спектрографы с высоким разрешением, такие как GIANO [45], серьезно расширили возможности для определения химического состава звездных атмосфер. В том числе, это касается и определения обилия серы по линиям трех инфракрасных мультиплетов: $\lambda 15400 - 15422$, $\lambda 15469 - 15478$ и $\lambda 22507 - 22707$ Å. В работе [46] был сделан некоторый анализ влияния не-ЛТР эффектов на эти линии с использованием модели серы 2009 г. Линии двух мультиплетов в области $\lambda 15400$ Å испытывают слабое влияние отклонений от ЛТР, а остальные образуются практически в ЛТР в атмосферах карликов солнечного типа. Эти выводы не изменились при использовании новой модели атома.

Для тестирования мы использовали пять звезд из исследования [46], у которых кроме спектра, полученного в ИК-области на спектрографе GIANO, доступны из архива ESO спектрограммы в оптическом диапазоне, полученные на спектрографе UVES. Это позволяет сравнить содержания серы, получаемые по линиям серы в оптике и H-диапазоне. Параметры исследуемых звезд даны в табл. 2. Используемые параметры линий S I в H-диапазоне приведены в табл. 1. Силы осцилляторов линий двух мультиплетов в области $\lambda 15400$ Å из BQZ и ZB имеют систематическое различие от 0.16 до 0.19 dex. Как было подробно обсуждено в статье [46], наблюдаемые профили на Солнце и исследуемых звездах лучше описываются, если использовать величину $lg\ gf = BQZ - 0.12$ dex. Для линий $\lambda 22507 - 22707$ Å величина сил осцилляторов BQZ и ZB отличается

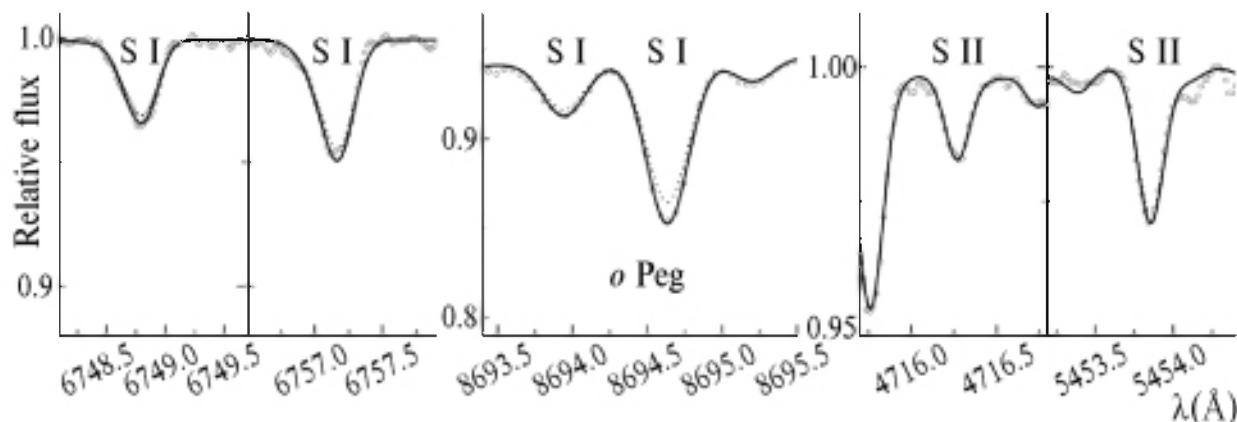


Рис. 6. Сравнение наблюдаемых (кружки) и синтетических профилей линий нейтральной и ионизованной серы в спектре *o Peg*. Не-ЛТР профиль показан сплошной линией, ЛТР профиль, рассчитанный с тем же содержанием, — штриховой.

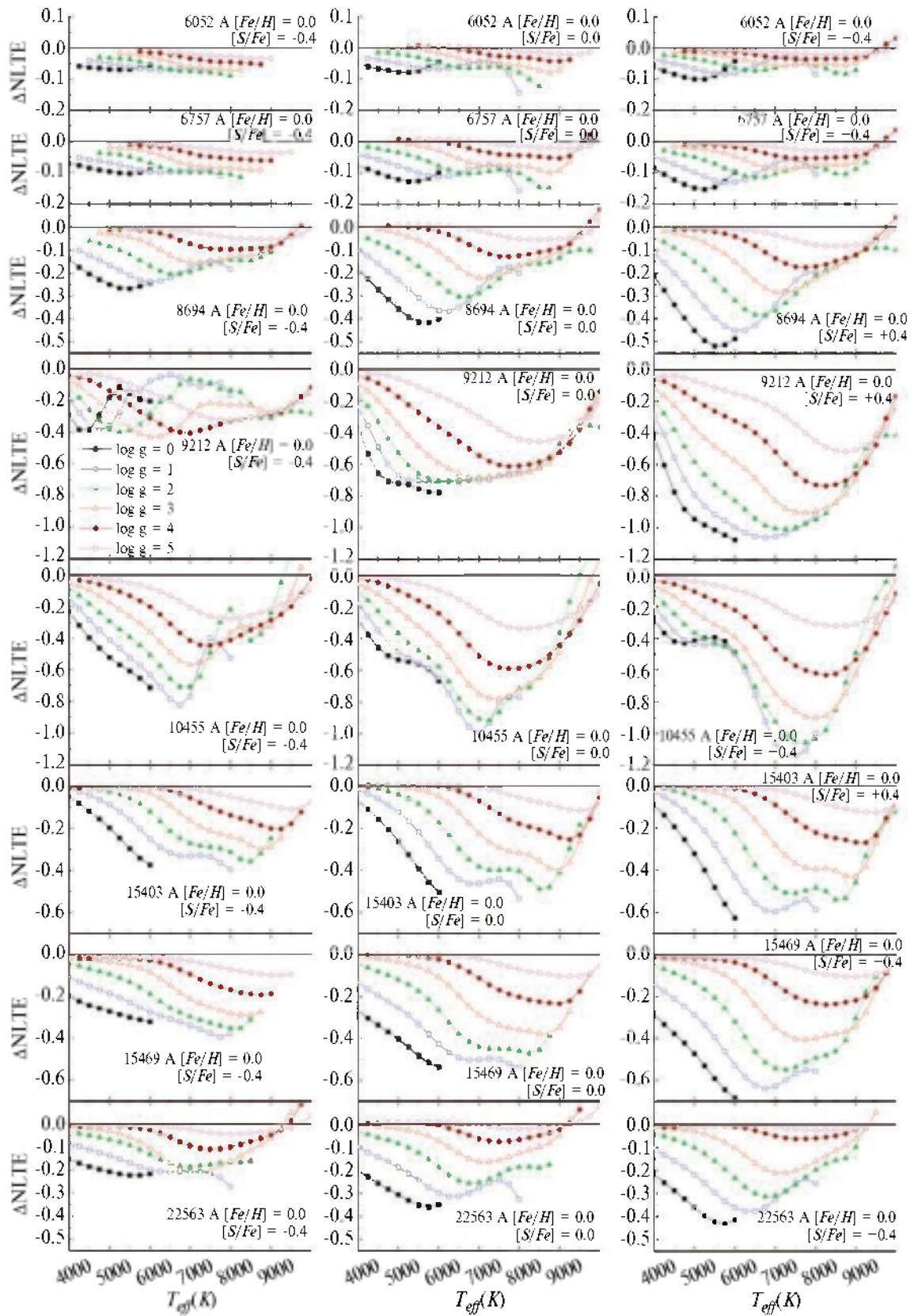
друг от друга случайным образом, приводя в среднем к одному содержанию. Для расчетов мы использовали данные BQZ. Результаты, приведенные в табл. 2, показывают, что содержания, полученные по линиям в оптическом диапазоне, неплохо соглашаются с данными из *H*-диапазона.

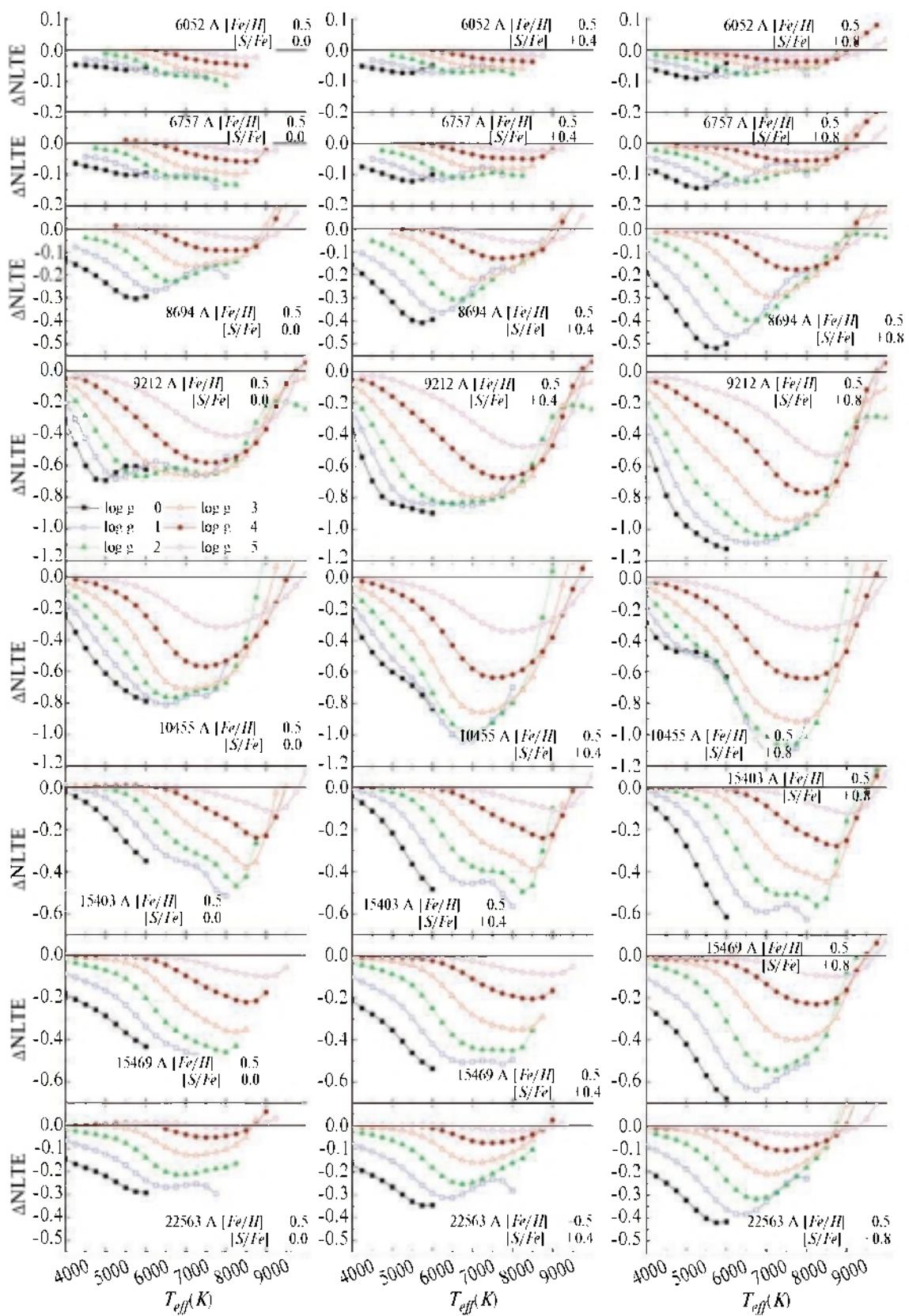
6. СЕТКА НЕ-ЛТР ПОПРАВОК ДЛЯ ЛИНИЙ НЕЙТРАЛЬНОЙ СЕРЫ

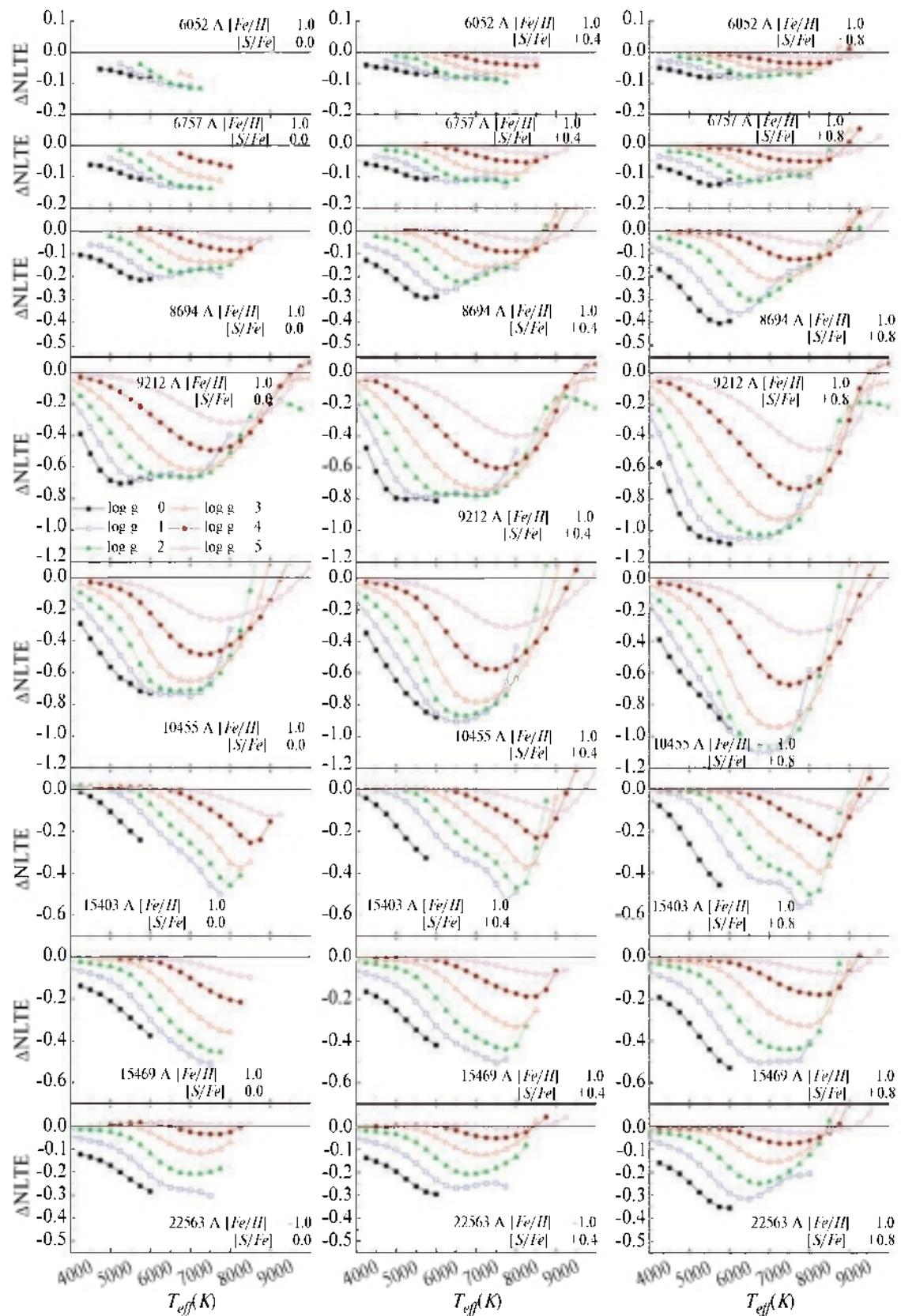
После того, как была проверена модель атома и уточнены параметры линий S I, пригодных для определения содержания серы, мы рассчитали сетку не-ЛТР поправок. В отличии от работ [6, 7], она включает в себя линии в *H*-диапазоне и расширена до более высоких эффективных температур. Диапазон параметров звездных атмосфер охватывает эффективные температуры от 4000 до 10000 K, ускорение силы тяжести $\lg g$ от 0 до 5 и содержание тяжелых элементов $[Fe/H]$ от 0 до -2. Микротурбулентная скорость выбрана равной 2 км/с. Расчеты для атмосфер с солнечной металличностью проводились при содержании серы $[S/Fe] = -0.4; 0.0; +0.4$ dex, для моделей с дефицитом металлов — $[S/Fe] = 0.0; +0.4; +0.8$ dex, так как для таких звезд обычно наблюдаются избытки α -элементов. Расчеты проводились путем подбора такого содержания серы, которое при учете не-ЛТР эффектов будет давать такую же эквивалентную ширину линии, как при расчетах в ЛТР с содержанием соответствующего узла сетки. Разница между этими содержаниями и есть поправка из-за влияния не-ЛТР эффектов. Поправки не рассчитывались, если эквивалентная ширина линии была меньше, чем 5 mÅ. Следует учитывать, что на величину не-ЛТР поправок существенное влияние может оказывать микротурбулент-

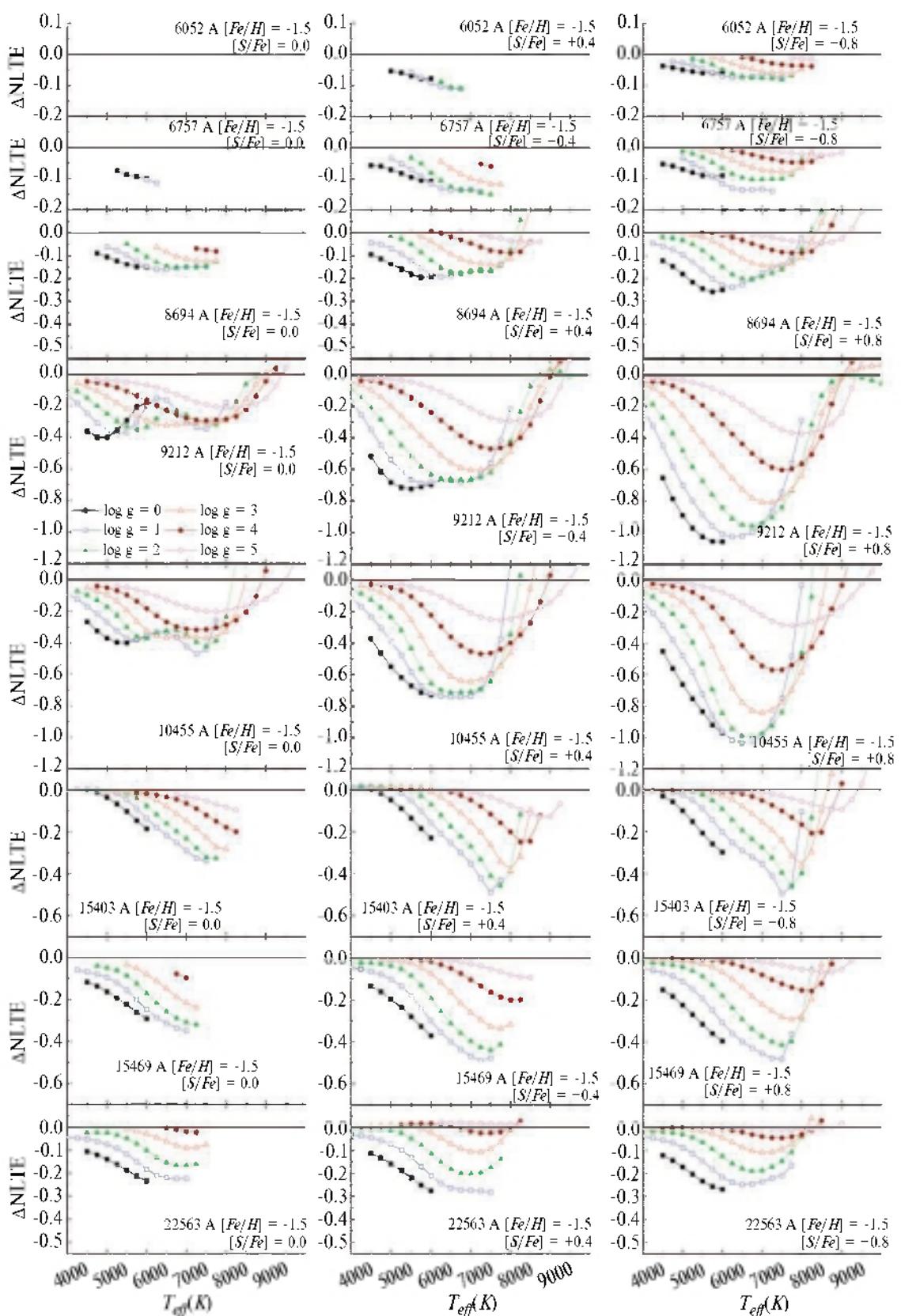
ная скорость, так как для сильных линий она существенным образом может изменять глубину их образования. Мы представляем результаты расчетов в виде графиков (рис. 7–11), так как на них более наглядно можно увидеть и оценить степень влияния не-ЛТР эффектов для той или иной исследуемой звезды, чем из таблиц. Можно видеть некоторые общие тенденции. Как следовало ожидать, абсолютное значение поправок возрастает при переходе от звезд-карликов к гигантам, так как менее плотная атмосфера гигантов уменьшает влияние столкновительных процессов, которые способствуют установлению термодинамического равновесия. Линии восьмого ($\lambda 6743 - 6757 \text{ \AA}$) и десятого ($\lambda 6046 - 6052 \text{ \AA}$) мультиплетов у звезд-карликов имеют наименьшие поправки и могут быть использованы при ЛТР анализе. Влияние не-ЛТР эффектов на эти линии существенны только для звезд-гигантов. Такой же вывод можно сделать для всех линий из *H*-диапазона. Линии шестого ($\lambda 8694 \text{ \AA}$) мультиплета немного более чувствительны к отклонениям от ЛТР, а линии двух ИК-триплетов можно использовать только при условии учета не-ЛТР поправок. Сетка величин не-ЛТР поправок доступна в электронном виде по DOI статьи. Для примера в табл. 4 приведены часть этих данных, где в первом столбце даны длина волны, в трех следующих — величины $[Fe/H]$, $[S/Fe]$ и T_{eff} , далее не-ЛТР поправки для пяти величин $\lg g$.

В целом, абсолютная величина поправок сначала растет с повышением эффективной температуры, так как на перераспределение населенности уровней серы активно влияет поле излучения в ультрафиолете. Однако, достигая некоторого максимума в районе 7000–8000 K, величина поправок начинает уменьшаться, так как все больше атомов серы пере-

Рис. 7. Не-ЛТР поправки для металличности $[Fe/H] = 0.0$.

Рис. 8. Не-LTP поправки для металличности $[Fe/H] = -0.5$.

Рис. 9. Пе-ЛГР поправки для металличности $[Fe/H] = -1.0$.

Рис. 10. Не-ЛТР поправки для металличности $[Fe/H] = -1.5$.

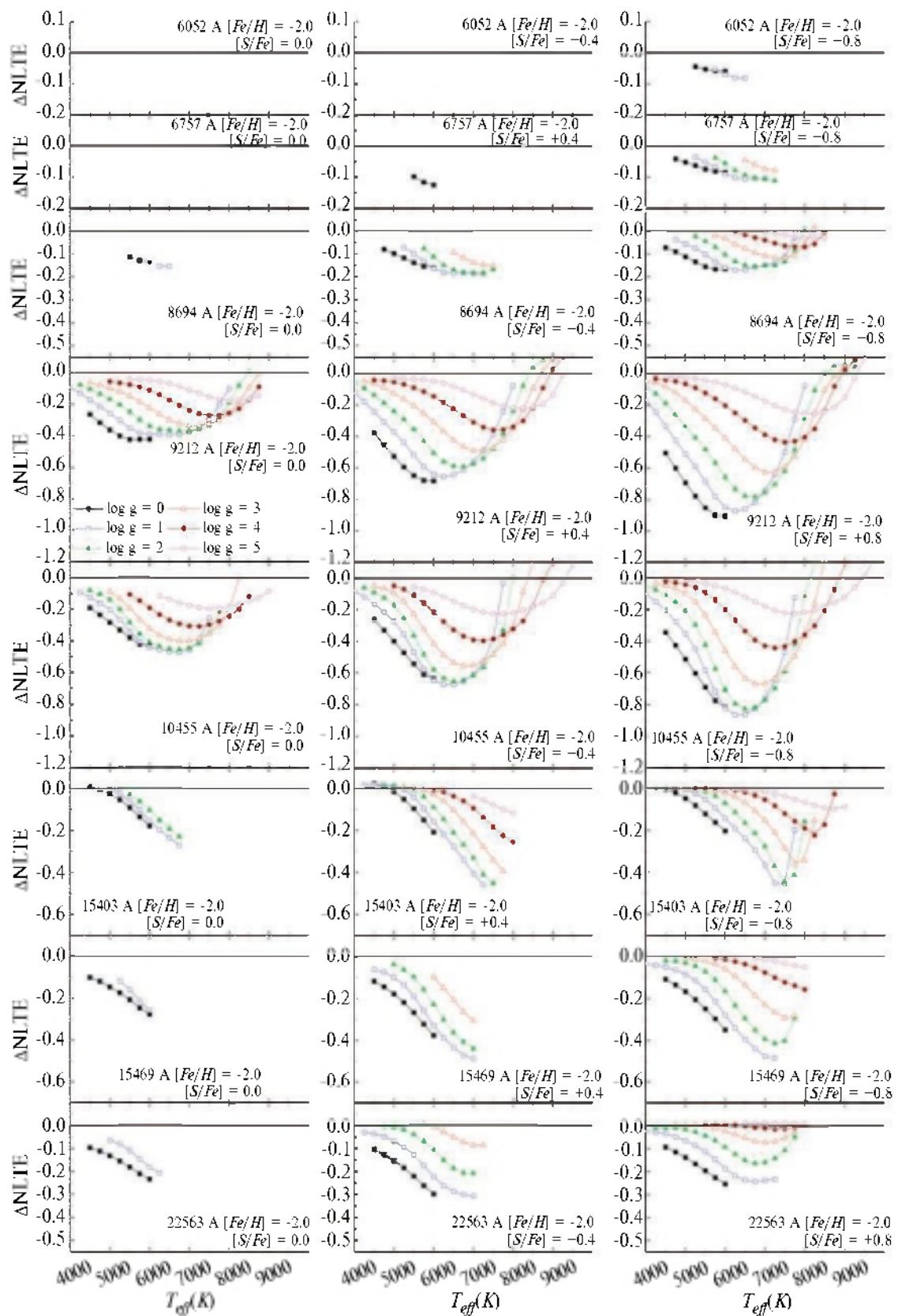
Рис. 11. Не-ЛТР поправки для металличности $[Fe/H] = -2.0$.

Таблица 4. Сетка не-ЛТР поправок линий S I

λ , Å	[Fe/H]	[S/Fe]	T_{eff} , K	$\lg g = 0$	$\lg g = 1$	$\lg g = 2$	$\lg g = 3$	$\lg g = 4$	$\lg g = 5$
6052.7	0.0	-0.4	4000						
6052.7	0.0	-0.4	4250	-0.06					
6052.7	0.0	-0.4	4500	-0.06	-0.04				
6052.7	0.0	-0.4	4750	-0.06	-0.04	-0.03			
6052.7	0.0	-0.4	5000	-0.07	-0.05	-0.03			
6052.7	0.0	-0.4	5250	-0.07	-0.05	-0.03	-0.02		
6052.7	0.0	-0.4	5500	-0.07	-0.06	-0.04	-0.02		
6052.7	0.0	-0.4	5750	-0.06	-0.07	-0.04	-0.02	-0.01	
6052.7	0.0	-0.4	6000	-0.06	-0.07	-0.05	-0.03	-0.01	
6052.7	0.0	-0.4	6250		-0.07	-0.06	-0.03	-0.02	
6052.7	0.0	-0.4	6500		-0.07	-0.07	-0.04	-0.02	-0.02
6052.7	0.0	-0.4	6750		-0.07	-0.07	-0.05	-0.03	-0.01
6052.7	0.0	-0.4	7000		-0.07	-0.08	-0.06	-0.03	-0.02
6052.7	0.0	-0.4	7250		-0.07	-0.08	-0.06	-0.04	-0.02
6052.7	0.0	-0.4	7500		-0.08	-0.08	-0.07	-0.04	-0.02
6052.7	0.0	-0.4	7750		-	-0.08	-0.07	-0.04	-0.03
6052.7	0.0	-0.4	8000		-	-0.09	-0.07	-0.05	-0.03
6052.7	0.0	-0.4	8250		-		-0.07	-0.05	-0.03
...

ходит в ионизованное состояние, линии серы становятся слабее и образуются глубже в атмосфере звезды, где усиливается влияние столкновительных процессов. Для звезд с эффективными температурами выше 9500 К не-ЛТР поправки для большинства линий у звезд-карликов становятся минимальными, либо даже меняют знак. Однако при этом и линии нейтральной серы у таких звезд ставятся очень слабыми. Величина поправок также сильно зависит от содержания серы, так как это определяет интенсивность ее спектральных линий и, соответственно, глубину их образования.

Применять величину не-ЛТР поправок для определения содержания достаточно надежно можно для случаев, когда их абсолютная величина менее 0.20–0.25 dex. Однако, следует понимать, что чем больше величина поправки, тем больше ее возможная ошибка из-за сложной зависимости от микротурбулентной скорости, содержания серы и т.п. В целом, рассчитанная сетка поправок может использоваться для оценки степени влияния не-ЛТР эффектов на линии серы. Для использования линий с большими не-ЛТР поправками следует проводить ин-

дивидуальные расчеты как b-факторов, так и синтетического спектра.

Если сравнить результаты наших не-ЛТР расчетов с расчетами с моделью атома 2009 г. [47], можно видеть, что для звезд с околосолнечной металличностью величины поправок достаточно близки между двумя моделями. Для звезд с дефицитом металлов новая модель показывает, как правило, несколько меньшие величины отклонений от ЛТР. Например, если при использовании старой модели атома для линии $\lambda 9212$ Å для звезды с параметрами $[Fe/H] = -1.0$, $\lg g = 2$ и $T_{\text{eff}} = 6000$ K поправка составляла около -0.85 dex, то новая модель приводит к меньшей величине: -0.75 dex. Для карликов с $\lg g = 4$ разница несколько меньше: -0.39 и -0.34 соответственно. Это результат использования в новой модели детальных квантово-механических расчетов ударных скоростей вместо приближенных аппроксимационных формул модели [7]. Стоит отметить, что отличия наших данных от расчетов [6] могут быть достаточно велики. В частности, для линии $\lambda 9212$ Å у звезды с параметрами $[Fe / H] = -1.0$ и $T_{\text{eff}} = 6000$ K из расчетов [6] следуют поправки в -1.02 для гиганта ($\lg g = 2$) и -0.26

dex для звезды-карлика ($\lg g = 4$). В работе [48] есть оценки не-ЛТР поправок для линий шестого мультиплета ($\lambda 8694 \text{ \AA}$) у A-звезд с $\lg g = 4$ и T_{eff} от 8000 до 12000 К. Величины поправок для температур менее 9500 К похожи на полученные нами, однако при более высоких температурах поправки остаются отрицательными, хотя и небольшими по величине.

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Нами предложена сетка поправок для учета влияния отклонений от ЛТР для линий нейтральной серы в видимой и инфракрасной области спектра, включая H -диапазон. Сетка рассчитана с использованием модели атома серы, включающей наиболее современные атомные данные об ударных скоростях с электронами и водородом. Включение в детальное рассмотрение в модель атома уровней и переходов ионизованной серы позволило расширить диапазон эффективных температур звездных фотосфер в сетке до 10000 К. Модель атома показала свою адекватность в широком диапазоне фундаментальных звездных параметров: у всех тестовых звезд линии серы описывались близким содержанием элемента вне зависимости от степени влияния не-ЛТР эффектов. Для линий нескольких мультиплетов были уточнены длины волн и величины сил осцилляторов. Создан список линий S I, рекомендуемый для определения содержания серы. Рекомендуемые параметры линий серы являются результатом компромисса между наблюдаемыми звездными спектрами и теоретическими расчетами длин волн и сил осцилляторов. Наилучшим вариантом получения точных значений параметров линий были бы лабораторные измерения для всех используемых в анализе линий серы.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *M. Limongi and A. Chieffi*, *Astrophys. J.* 592, 404 (2003), arXiv:astro-ph/0304185.
2. *C. Kobayashi, A.I. Karakas, and M. Lugaro*, *Astrophys. J.* 900, 179 (2020), arXiv:2008.04660 [astro-ph.GA].
3. *G. Israelian and R. Rebolo*, *Astrophys. J.* 557, L43 (2001), arXiv:astro-ph/0107072.
4. *M. Spite, E. Caffau, S.M. Andrievsky, S.A. Korotin, et al.*, *Astron. and Astrophys.* 528, id. A9 (2011), arXiv:1012.4358 [astro-ph.SR].
5. *N. Kacharov, A. Koch, E. Caffau, and L. Sbordone*, *Astron. and Astrophys.* 577, id. A18 (2015), arXiv:1503.02691 [astro-ph.GA].
6. *Y. Takeda, O. Hashimoto, H. Taguchi, K. Yoshioka, M. Takada-Hidai, Y. Saito, and S. Honda*, *Publ. Astron. Soc. Japan* 57, 751 (2005), arXiv:astro-ph/0509239.
7. *S.A. Korotin*, *Astron. Rep.* 53(7), 651 (2009).
8. *A.K. Belyaev and Y.V. Voronov*, *Astrophys. J.* 893(1), id. 59 (2020).
9. *H.W. Drawing*, *Zeitschrift für Physik* 211, 404 (1968).
10. *W. Steenbock and H. Holweger*, *Astron. and Astrophys.* 130(2), 319 (1984).
11. *H.P. Summers and M.G. O'Mullane*, in *7th International Conference on Atomic and Molecular Data and Their Applications - (ICAMDATA-2010)*, held in Vilnius, Lithuania, on September 21–24, 2010; edited by A. Bernotas, R. Karazija, and Z. Rudzikas, *AIP Conf. Ser.* 1344, 179 (2011).
12. *W.C. Martin, R. Zalubas, and A. Musgrove*, *J. Phys. and Chem. Ref. Data* 19(4), 821 (1990).
13. *W. Cunto, C. Mendoza, F. Ochsenbein, and C.J. Zeippen*, *Astron. and Astrophys.* 275, L5 (1993).
14. *R. Hirata and T. Horaguchi*, *VizieR On-line Data Catalog: VI/69*, Department of Astronomy, Faculty of Science, Kyoto University, and National Science Museum, 3-23-1 Hyakunin-cho, Shinjuku-ku, Tokyo (1994).
15. *S.S. Tayal and O. Zatsarinny*, *Astrophys. J. Suppl.* 188(1), 32 (2010).
16. *H. van Regemorter*, *Astrophys. J.* 136, 906 (1962).
17. *C.W. Allen*, *Astrophysical quantities* (University of London, Athlone Press, 1973).
18. *M.J. Seaton*, *Atomic and Molecular Processes*, edited by D. R. Bates (New York: Academic Press, 1962).
19. *M. Carlsson*, *Upps. Astron. Obs. Rep.* № 33 (1986).
20. *S.A. Korotin, S.M. Andrievsky, and R.E. Luck*, *Astron. and Astrophys.* 351, 168 (1999).
21. *F. Castelli and R.L. Kurucz*, in *Modelling of Stellar Atmospheres*, Proc. of the 210th Symp. IAU held at Uppsala University, Uppsala, Sweden, 17–21 June, 2002; edited by N. Piskunov, W. W. Weiss, and D. F. Gray, *ASP Conf. Ser.* 210, id. A20 (2003), arXiv:astro-ph/0405087.
22. *V. Tsymbal, T. Ryabchikova, and T. Sitnova*, *Physics of Magnetic Stars*, Proc. of a Conference held 1–5 October, 2018 at SAO, Nizhny Arkhyz, Russia; edited by D. O. Kudryavtsev, I. I. Romanyuk, and I. A. Yakunin (San Francisco: ASP, 2019), *ASP Conf. Ser.* 518, 247 (2019).
23. *T. Ryabchikova, N. Piskunov, R.L. Kurucz, H.C. Stempels, U. Heiter, Y. Pakhomov, and P.S. Barklem*, *Physica Scripta* 90(5), id. 054005 (2015).
24. *R.L. Kurucz, I. Furenlid, J. Brault, and L. Testerman*, *Solar flux atlas from 296 to 1300 nm* (New Mexico: National Solar Observatory, Sunspot, 1984).

25. *A. Reiners, N. Mrotzek, U. Lemke, J. Hinrichs, and K. Reinsch*, Astron. and Astrophys. 587, id. A65 (2016), arXiv:1511.03014 [astro-ph.SR].
26. *M. Asplund, A.M. Amarsi, and N. Grevesse*, Astron. and Astrophys. 653, id. A141 (2021), arXiv:2105.01661 [astro-ph.SR].
27. *P.S. Barklem and B.J. O'Mara*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. 290, 102 (1997).
28. *P.S. Barklem, B.J. O'Mara, and J.E. Ross*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. 296, 1057 (1998).
29. *R. Zerne, L. Caiyan, U. Berzinsh, and S. Svanberg*, Physica Scripta 56(5), 459 (1997).
30. *E. Biemont, P. Quinet, and C.J. Zeippen*, Astron. and Astrophys. Suppl. Ser. 102, 435 (1993).
31. *O. Zatsarinny and K. Bartschat*, J. Physics B: Atomic, Molecular, and Optical Physics 39(12), 2861 (2006).
32. *C. Froese Fischer, G. Tachiev, and A. Irimia*, Atomic Data and Nuclear Data Tables 92, 607 (2006).
33. *N.C. Deb and A. Hibbert*, Atomic Data and Nuclear Data Tables 94, 561 (2008).
34. *K. Lodders*, Space Sci. Rev. 217(3), id. 44 (2021).
35. *A. Kramida, Y. Ralchenko, and J. Reader*, in APS Division of Atomic, Molecular and Optical Physics. APS Meeting Abstracts 43, D1.004 (2012).
36. *P. Jofré, U. Heiter, C. Soubiran, S. Blanco-Cuaresma, et al.*, Astron. and Astrophys. 582, id. A81 (2015), arXiv:1507.00027 [astro-ph.SR].
37. *L.S. Lyubimkov, D.L. Lambert, S.I. Rostopchin, T.M. Rachkovskaya, and D.B. Poklad*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. 402, 1369 (2010), arXiv:0911.1335 [astro-ph.SR].
38. *R.G. Tull, P.J. MacQueen, C. Sneden, and D.L. Lambert*, Publ. Astron. Soc. Pacific 107, 251 (1995).
39. *S. Bagnulo, E. Jehin, C. Ledoux, R. Cabanac, et al.*, Messenger 114, 10 (2003).
40. *G.A. Galazutdinov*, Astrophys. Bull. 77(4), 519 (2022).
41. *S. Mészáros, C. Allende Prieto, B. Edvardsson, F. Castelli, et al.*, Astron. J. 144(4), id. 120 (2012), arXiv:1208.1916 [astro-ph.SR].
42. *A.M. Romanovskaya, T.A. Ryabchikova, Y.V. Pakhomov, S.A. Korotin, and T.M. Sitnova*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. 526, 3386 (2023), arXiv:2309.08384 [astro-ph.SR].

INFLUENCE OF DEPARTURES FROM LTE ON DETERMINATIONS OF THE SULPHUR ABUNDANCES IN A–K TYPE STARS

S. A. Korotin, K. O. Kiselev

Crimean Astrophysical Observatory, Nauchny, Crimea, Russia

E-mail: serkor1@mail.ru

The influence of departures from local thermodynamic equilibrium on neutral sulfur lines is considered. A grid of corrections is proposed to take into account the influence of departures from LTE for neutral sulfur lines in the visible and infrared spectral regions, including the *H*-band. The grid is calculated using the atomic model of sulfur incorporating the most up-to-date collision rates with electrons and hydrogen. The inclusion of levels and transitions of ionized sulfur in the atomic model made it possible to expand the range of effective temperatures of stellar photospheres in the grid, up to 10 000 K. The atomic model was tested in determining the sulfur abundance of 13 stars and showed its adequacy in a wide range of fundamental stellar parameters. In the spectra of all test stars, the sulfur lines are fitted with similar abundances of the element, regardless of the degree of influence of the effects of deviation from LTE on a particular spectral line. For lines of several multiplets, the wavelengths and oscillator strengths were refined. A list of S I lines recommended for determining sulfur abundance has been created.

Keywords: line formation, line profiles of stars, elemental abundances on the Sun