

УДК 523.94

Н. Г. Щукина¹, Н. Трухильо Буэно², И. Э. Васильева¹

¹Главная астрономическая обсерватория Национальной академии наук Украины,
03680 ГСП, Киев, ул. Академика Заболотного, 27

²Институт Астрофизики,
E-38200, Ла-Лагуна, Тенерифе, Испания

Звездная грануляция и НЛТР-образование линий Fe I: звезда гало с дефицитом металлов HD 140283

Рассмотрено НЛТР-образование линий Fe I в спектрах гранул и межгранул звезды гало с дефицитом металлов HD 140283. Результаты получены путем самосогласованного решения системы уравнений статистического равновесия и переноса излучения для трехмерной гидродинамической модели грануляции и реалистичной модели атома Fe I + Fe II. Эффекты горизонтального переноса излучения не учитывались. Показано, что основным НЛТР-эффектом при образовании линий Fe I является дефицит непрозрачности в гранулах. Он ведет к смещению области формирования линий Fe I в глубокие слои, где их функции источника равны функции Планка. В отличие от солнечного случая это смещение исключительно велико. Как следствие, линии Fe I в спектрах звездных гранул при НЛТР оказываются заметно ослабленными. Различия между НЛТР- и ЛТР-профилями в спектре интергранул невелики. Показано, что при учете НЛТР-эффектов значения содержания железа в рассматриваемой звезде, полученные как на основе трехмерной гидродинамической модели атмосферы, так и одномерной, практически совпадают.

ЗОРЯНА ГРАНУЛЯЦІЯ І НЛТР-УТВОРЕННЯ ЛІНІЙ Fe I: ЗІРКА ГАЛО З ДЕФІЦИТОМ МЕТАЛІВ HD 140283, Щукіна Н. Г., Трухільо Буєно Н., Васильєва І. Є. — Розглянуто НЛТР-утворення ліній Fe I в спектрах гранул та міжгранул зірки гало з дефіцитом металів HD 140283. Результати отримано шляхом самоузгодженого розв'язку системи рівнянь переносу випромінювання для тривимірної гідродинамічної моделі грануляції і реалістичної моделі атома атома Fe I + Fe II. Ефекти горизонтального переносу випромінювання враховувались. Показано, що основним НЛТР-ефектом при утворенні ліній Fe I є дефіцит непрозорості в гранулах. Він веде до зміщення області формування ліній Fe I в глибокі шари, де їхні функції джерела дорівнюють функції Планка. На відміну від сонячного випадку це зміщення надзвичайно велике. Як наслідок, лінії Fe I в спектрах зоряних гранул при НЛТР виявляються помітно послабленими. Розходження між НЛТР- і ЛТР-профілями у спектрі інтергранул невеликі. Показано, що вміст заліза в зорі, отрима-

ний як на основі використання тривимірної гідродинамічної моделі атмосфери, так і одновимірної, практично збігаються.

STELLAR GRANULATION AND THE NLTE FORMATION OF THE Fe I lines: THE METAL-POOR HALO STAR HD140283, by Shchukina N. G., Trujillo Bueno J., Vasil'eva I. E. — The NLTE Fe I line formation problem in a three-dimensional granulation model of the metal-poor halo star HD 140283 is considered. The self-consistent solutions of the kinetic and radiative transfer equations were obtained with a realistic atomic model Fe I + Fe II. The effects of horizontal radiative transfer are neglected. The near-UV overionisation effect is found to lead to sizeable Fe I opacity deficits in the granular atmospheric regions. This NLTE effect tends to produce weaker emergent spectral lines than in LTE because they are formed deeper in the stellar granules where the source functions are close to the Planck function. The NLTE effects in the integranule spectra are small. If NLTE effects are shown to be fully taken into account both in the three-dimensional and one-dimensional models of the star HD140283 the iron abundance is in close agreement for both cases.

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что в атмосферах звезд поздних спектральных классов, начиная со средних подтипов F, доминирующую роль в переносе энергии играет конвекция. Грануляция, порождаемая ею, ведет к неоднородности фотосфер указанных звезд. Без понимания физики образования спектральных линий в таких фотосферах вряд ли возможна грамотная интерпретация современных спектральных наблюдений. Решение проблемы образования линий в спектрах звезд с проникающей конвекцией требует численного моделирования переноса излучения для реалистичных моделей атомов, включающих множество уровней и радиативных переходов (т. н. многоуровневые модели), и для динамических двух- (2D) или трехмерных (3D) моделей атмосфер. Одна из основных трудностей, с которой сталкивается указанное моделирование, связана с тем, что становится невозможным использовать равновесные соотношения статистической механики и термодинамики при локальных значениях температуры и плотности, известные как гипотеза о локальном термодинамическом равновесии (ЛТР). Другая трудность связана с необходимостью учета неоднородной структуры атмосферы.

В настоящее время сложились благоприятные условия для преодоления указанных трудностей. В частности, численное моделирование конвекции [1, 7, 8, 18, 19, 22, 23, 37, 53, 54, 56, 57, 68, 69] привело к созданию разнообразных 2D- и 3D-гидродинамических моделей грануляции. Более того, появились полуэмпирические солнечные модели грануляции [10, 59]. Успешно разрабатываются численные методы многоуровневого переноса излучения в многомерных средах [24, 36, 65, 72] и их программное обеспечение [64].

Несмотря на наметившийся прогресс в решении проблемы образования линий в спектрах звезд с проникающей конвекцией, в подавляющем большинстве исследований, касающихся обсуждаемой тематики, пренебрегают эффектами отклонения от ЛТР (или, иными словами, НЛТР-эффектами) и сосредотачивают основное внимание на эффектах, вызванных неоднородностью [5, 6, 9, 17, 19—23, 34, 35, 37, 45]. Число работ, в которых одновременно учитывались бы оба эффекта, невелико [12, 44, 55, 64, 73]. В первую очередь они касаются НЛТР-образования спектров атомов, имеющих простую структуру. Так, Кисельман [44] и Уйтенброк [73] выполнили НЛТР-расчеты солнечных спектральных линий Li I,

используя 3D-модели грануляции Стейна и Нордлунда [68]. Оказалось, что учет неоднородностей в этом случае ведет к изменению содержания лития в атмосфере Солнца на величину, не превышающую 0.1 dex.

Другой объект исследования — линии Fe I, особенно интенсивные в спектре Солнца и холодных звезд. Серьезная проблема, с которой сталкивается диагностика этих линий — чрезвычайно сложная структура термов и радиативных связанно-связанных переходов атома железа. Согласно Наве и др. [52] только одна модель атома Fe I содержит около 300 термов и 5000 мультиплетов. Численные проблемы, возникающие при учете эффектов взаимосвязи полей излучения линий в модели атома столь сложной конфигурации, служат препятствием для использования при интерпретации спектра Fe I программ решения многоуровневых задач переноса излучения типа LINEAR [25] и MULTI [33], основанных на методе линеаризации. При пользовании такими программами приходится обращаться к упрощенным моделям атома железа. В частности, Нордлундом [55] при рассмотрении образования линий Fe I в его 3D-модели солнечной атмосферы были приняты во внимание НЛТР-эффекты, вызванные только УФ-сверхионизацией. Стодилка [12] решил многоуровневую задачу переноса излучения в линиях Fe I для 2D-модели солнечной грануляции Гадуна [6] и достаточно простой модели атома железа. НЛТР-образование линий Fe I в 3D-гидродинамической модели солнечной грануляции [18, 20] в рамках 1.5D-приближения и для реалистичной модели атома Fe I + Fe II было рассмотрено недавно в работе Щукиной и Трухильо Буэно [64]. Используемая в последней работе модель является, по существу, аналогом моделей грануляции Стейна и Нордлунда [68, 69], но полученная с более высоким пространственным разрешением и с более реалистичными уравнениями состояния. Модели этого типа уже продемонстрировали свою эффективность при интерпретации солнечной грануляции [20] и в исследованиях по гелиосейсмологии [43]. Их применение для решения вопроса о величине содержания железа на Солнце, ставшей предметом острых дискуссий в последние годы (см., например, [41, 46]), также принесло свои плоды. При учете НЛТР-эффектов и грануляционной структуры, как показали в своей работе Щукина и Трухильо Буэно [64], фотосферное содержание железа оказывается близким к метеоритному.

В нашей статье будет рассмотрено НЛТР-образование линий Fe I в трехмерной модели звездной грануляции. В качестве объекта исследования мы выбрали звезду гало с дефицитом металлов HD140283. Звезды этого типа являются уникальным источником информации о ранних этапах эволюции Вселенной, так как они относятся к наиболее старым звездам Галактики. Именно на примере HD140283 было показано, насколько важно при анализе химического состава холодных звезд с дефицитом металлов учитывать неоднородную структуру их атмосфер. Согласно Асплунду и др. [19] содержание железа, найденное для одномерной модели этой звезды, почти на 0.4 dex отличается от величины, полученной с гидродинамической 3D-моделью. Вывод о необходимости учета неоднородной структуры при определении содержания железа в звездах был сделан также в работе Гадуна и Плонера [9]. Столь большие расхождения ставят под сомнение результаты определения содержания Fe в звездах с дефицитом металлов, основанные на применении одномерных плоскопараллельных моделей атмосфер.

Эффекты, вызванные неоднородностью, оценивались в работах [9, 19] в предположении, что для линий Fe I справедлива ЛТР-гипотеза. В настоящее время имеется достаточно большое количество как теоретических исследований по оценке НЛТР-эффектов в звездах для одномерных моделей

атмосфер [2, 4, 11, 38—40, 42, 48—50, 58, 61, 67, 70, 71], так и эмпирических исследований [51, 60]. Эти работы показывают, что УФ-сверхионизация нейтрального железа служит причиной систематических различий между содержанием, найденным в ЛТР-приближении, и содержанием при НЛТР. В 1D-моделях для звезд с дефицитом металлов эти поправки могут достигать 0.5 dex. В 3D-моделях НЛТР-поправки должны быть еще больше из-за более крутого градиента температуры по сравнению с классическими одномерными моделями, рассчитанными при тех же значениях эффективных температур $T_{\text{эф}}$, ускорения силы тяжести g и металличности $[\text{Fe}/\text{H}]$. Цель нашей статьи — оценить количественно, как изменится содержание железа в звезде гало HD140283 по сравнению с 1D-случаем, если принять во внимание не только неоднородную структуру ее атмосферы, но и НЛТР-эффекты при образовании линий Fe I.

МОДЕЛЬ АТОМА Fe И МЕТОД РЕШЕНИЯ

Для выполнения поставленной цели мы решили многоуровневую задачу переноса излучения в линиях атома Fe. Решение было получено как для плоскопараллельной 1D-модели звездной атмосферы, так и для 3D-модели звездной грануляции. В качестве численного метода решения мы выбрали метод прекондиционирования (preconditioning). Данный метод получил свое наиболее полное развитие в работах Трухильо Буэно и его коллег [24, 36, 65, 72]. Согласно работе [65] метод прекондиционирования в отличие от метода линеаризации всегда дает положительное решение для населенностей. Кроме того, он обеспечивает более высокую и гладкую сходимость. Преимущества метода особенно заметны при использовании сложной модели атома Fe. Новое программное обеспечение NATAJA, разработанное Шукиной и Трухильо Буэно [64] на основе метода прекондиционирования, позволяет исследовать условия возбуждения и ионизацию атомов в звездных динамических атмосферах (как в 1D, так и 3D), принимая во внимание реальную сложность атомной модели. На данном этапе оно основано на предположении о полном перераспределении излучения в линиях. Эффекты горизонтального переноса не учитываются. Это означает, что НЛТР-моделирование проводится в рамках 1.5D-приближения, т. е. для каждой вертикальной колонки 3D-модели грануляции отдельно как для плоскопараллельной атмосферы с последующим усреднением по пространству.

Модель атома Fe I + Fe II, используемая ниже, уже нашла свое применение в исследованиях по НЛТР-образованию линий Fe I в спектрах невозмущенной атмосферы Солнца [13, 14], солнечного пятна [63] и солнечной грануляции [64]. Ее детальное описание можно найти там же. Напомним, что модель является фактически полной вплоть до потенциала возбуждения $EP = 5.72$ эВ. Выше, до $EP = 7$ эВ она содержит около 50 % термов, идентифицированных на сегодня. Важная особенность модели — учет тонкой структуры большинства термов и реальной радиативной связи между ними, осуществляемой при переходах в линиях мультиплетов. Модель атома Fe II соответствует модели Гигаса [39]. В целом модель атома Fe I + Fe II содержит 249 уровней и 489 радиативных связанно-связанных и связанно-свободных переходов в УФ-, видимом и ИК-диапазонах спектра, в том числе переходы с уровней вблизи континуума Fe I.

МОДЕЛИ АТМОСФЕРЫ

Трехмерная модель звездной грануляции (для одного момента времени) была предоставлена в наше распоряжение Асплундом [19]. Модель рассчи-

тана для металлодефицитной звезды гало HD 140283, имеющей следующие параметры: эффективная температура $T_{\text{эф}} = 5700$ К, ускорение свободного падения $\lg g = 3.7$ и металличность $[\text{Fe}/\text{H}] = -2.5$. Следует отметить, что параметры атмосферы звезды HD 140283, полученные разными методами, не совпадают. Дискуссию по этому вопросу, а также по методам определения звездных параметров можно найти в статьях [3, 19, 40, 42]. Причины, по которым мы выбрали вышеупомянутые параметры, связаны с тем, что именно с ними оценивалось влияние неоднородностей на определение содержания Fe в обсуждаемой выше работе [19]. Моделируемая область грануляции представляет собой куб размерностью 35×35 Мм (100×100 точек сетки) в горизонтальной плоскости XY и высотой 12 Мм в вертикальном направлении Z (82 точки). При решении многоуровневой задачи переноса излучения мы использовали только верхнюю часть куба высотой 4 Мм (т. е. фотосферные слои, где формируется излучение в континууме и линиях) и новую сетку из 121 точки. Чтобы уменьшить объем вычислений, первоначальный куб был проинтерполирован в горизонтальной плоскости {XY} на более грубую шкалу размерности 50×50 точек (расстояние между соседними точками 0.714 Мм). Из тех же соображений совместное решение уравнений переноса излучения и статистического равновесия было выполнено только вдоль одного направления Y. На XY поверхности моделируемого конвективного куба этому направлению соответствует индекс $Y = 24$. На рис. 1 (слева внизу) представлены вариации температуры с высотой и вдоль указанного направления для рассматриваемой модели. В результате мы имеем 50 1D-моделей атмосферы, каждая из которых описывает вариации с высотой Z в точке XY физических параметров (температуры, плотности, скорости и т. п.). Из этого множества моделей мы выделили две, одна из которых представляет типичную модель «гранулы» и вторая — модель «межгранулы» (X-индексы равны соответственно 3 и 9). Особенность рассматриваемой 3D-модели состоит в том, что в глубоких атмосферных слоях зависимость кинетической температуры от высоты, выраженной в единицах массы m , совпадает с солнечной. Однако в поверхностных слоях эта модель существенно холоднее по сравнению с 3D-солнечной моделью и 1D-звездной моделью, рассчитанной при тех же значениях $T_{\text{эф}}$, $\lg g$ и $[\text{Fe}/\text{H}]$. Определение содержания для одномерного случая было выполнено с моделью Куруца [47], рассчитанной по программе ATLAS9 в приближении лучистого равновесия и ЛТР при одинаковых с 3D-моделью звездных параметрах.

НЛТР-ЭФФЕКТЫ В ЛИНИЯХ Fe I

Населенности уровней, области формирования и функции источника. В холодных звездах с дефицитом металлов избыток УФ-фотонов оказывается заметно больше, чем в атмосфере Солнца. Причинами этому служат, во-первых, намного более крутой градиент температуры и, во-вторых, незначительная, вследствие дефицита металлов дополнительная непрозрачность, создаваемая частотным линиям [40]. Как следствие, отклонение от ЛТР-населенностей уровней Fe I в 3D-модели звезды HD 140283 должно быть выше, чем в 3D-модели Солнца (см. подробнее [34, 55]).

На рис. 1 мы показываем поведение коэффициентов β отклонения от ЛТР-населенностей нижнего и верхнего уровней Fe I линии $\lambda 501.207$ нм с высотой для всех точек поверхности, расположенных вдоль одного из направлений ($Y = 24$). Из сравнения этих результатов с результатами для солнечной грануляции, приведенными в работе [64], видно, что действительно в верхних слоях гранул недонаселенность уровней на несколько

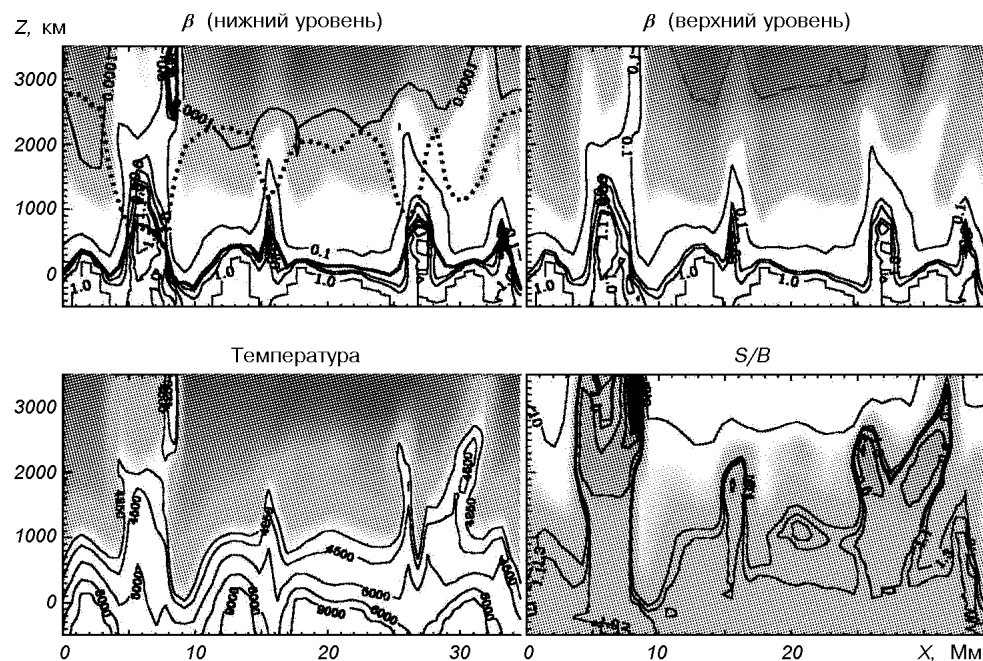


Рис. 1. Вверху — распределение коэффициентов β отклонения от ЛТР для нижнего и верхнего уровня. линии Fe I λ 501.207 нм в плоскости XZ трехмерной гидродинамической модели звезды HD 140283. Горизонтальная ось X, проходящая через $Y = 24$, направлена вдоль поверхности звезды. Вертикальная ось Z — высота. Внизу — распределения кинетической температуры и функции источника в линии, выраженной в единицах функции Планка в той же плоскости XZ. Более светлые тона соответствуют более высоким значениям β , T и S/B. Тонкие линии — линии одинаковых значений, толстая сплошная и пунктирная линии — соответственно уровни, где при НЛТР и ЛТР оптическая глубина в центре линии равна единице

порядков выше, чем на Солнце. В межгранулах УФ-сверхионизация неэффективна, вследствие чего недонаселенность существенно меньше. Из наших расчетов следует, что в отличие от солнечного случая β -коэффициенты для высоковозбужденных уровней по величине больше, чем для низковозбужденных. Усиление с увеличением потенциала возбуждения EP ударной взаимосвязи с континуумом должно неизбежно вести к подобному поведению коэффициентов, если только не будет сильных потерь фотонов в линиях с высокими значениями EP верхнего уровня (что происходит в солнечных гранулах). В звезде HD 140283 линии Fe I из-за низкого содержания железа ослаблены, поэтому незначительные потери фотонов в них не в состоянии что-либо существенно изменить.

Как и в солнечном случае, дефицит атомов нейтрального железа в звездных гранулах сопровождается смещением области формирования линий Fe I в более глубокие слои. Однако в отличие от первого случая это смещение исключительно велико. Мерой указанного смещения служит разность $\Delta h = h_{\text{ЛТР}} - h_{\text{НЛТР}}$ между высотой h , где при ЛТР оптическая глубина в центре линии $\tau_{\text{ЛТР}} = 1$ и высотой, где при НЛТР $\tau_{\text{НЛТР}} = 1$. Как правило, в гранулах величина Δh составляет 1000 км и более. Согласно [66] подобное определение высот образования линий Fe I вместо более точных функций отклика [62] не должно существенно повлиять на величину Δh , поскольку относительное смещение высот, обусловленное изменением непрозрачности из-за НЛТР-эффектов, в обоих случаях будет приблизительно

одинаковым. Смещение Δh для одной из линий Fe I λ 501.207 нм показано на рис. 1. Такое смещение характерно для всех линий Fe I в оптическом диапазоне спектра. В межгранулах область формирования линий Fe I изменяется незначительно.

В глубоких областях звездной атмосферы, где при НЛТР образуются рассматриваемые линии, функции источника близки к функции Планка (рис. 1). Таким образом, в отличие от солнечного случая мы имеем лишь один НЛТР- эффект — дефицит непрозрачности. Это ведет к увеличению интенсивности излучения в линиях, поскольку в глубоких слоях температура (и значит, функция источника) выше.

Профили линий. При синтезе линий Fe I мы приняли во внимание доплеровские смещения коэффициента поглощения, вызванные конвективным полем скоростей 3D-модели. Поэтому параметры микро- и макротурбулентной скорости, используемые в одномерном моделировании, не учитывались. При вычислении коэффициента поглощения в линии постоянная уширения Ван-дер-Ваальса определялась в соответствии с квантово-механическими расчетами [16, 26, 27]. Коэффициент поглощения в континууме находился без учета непрозрачности, создаваемой частотоклом линий. На рис. 2 мы показываем вариации интенсивности излучения и эквивалентной

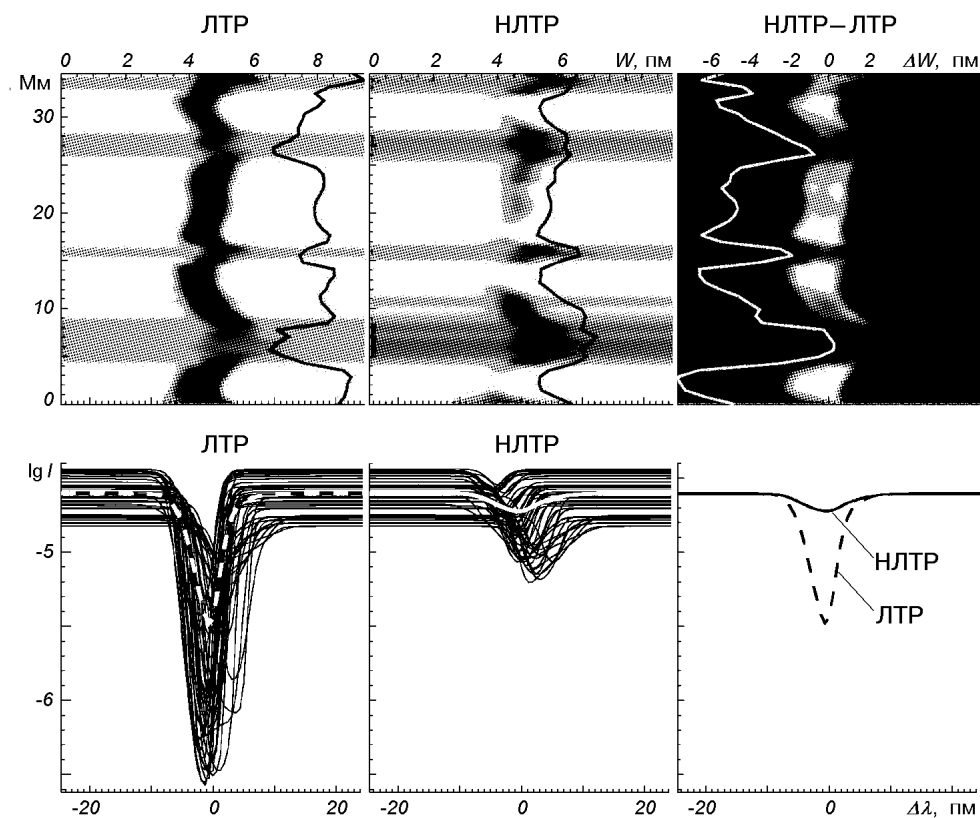


Рис. 2. Вверху — вариации интенсивности излучения в линии Fe I λ 501.207 нм вдоль поверхности звезды HD 140283 в виде спектрального изображения щели спектрографа, расположенной вдоль направления $Y = 24$ (положение на диске звезды $\mu = 1$; содержание железа 5.5). Кривые — значения эквивалентной ширины линии. Приведены ЛТР-, НЛТР-данные и их разность. Внизу — ЛТР- и НЛТР-интенсивности выходящего излучения в линии λ 501.207 нм для 50 1D-моделей, соответствующих направлению $Y = 24$. Усредненные интенсивности показаны светлыми кривыми. Они же отдельно показаны справа (размерность интенсивностей $\text{эрг} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{стер}^{-1} \cdot \text{Гц}^{-1}$)

ширины линии Fe I λ 501.207 нм вдоль направления $Y = 24$ на поверхности звезды HD 140283, рассчитанные для вышеописанной 3D-модели [19]. Представленные результаты достаточно типичны. Вкратце они сводятся к следующему.

1. При НЛТР линии Fe I в спектре гранул выглядят намного слабее, чем при ЛТР. Различия между НЛТР- и ЛТР-профилями в спектре интергранул невелики.

2. Наиболее чувствительны к НЛТР-эффектам ядра линий. При НЛТР гранулы на длинах волн, соответствующих центрам линий Fe I, будут выглядеть ярче по сравнению с ЛТР-случаем.

Линии Fe I, использованные для определения содержания железа в звезде HD 140283

| λ , нм | EPL, эВ | lggf | W, пм |
|----------------|---------|--------|-------|
| 421.619 | 0.00 | -3.360 | 3.89 |
| 473.360 | 1.49 | -2.990 | 0.55 |
| 501.207 | 0.86 | -2.640 | 3.23 |
| 519.871 | 2.22 | -2.140 | 0.85 |
| 570.155 | 2.56 | -2.220 | 0.25 |
| 606.549 | 2.61 | -1.530 | 0.99 |
| 613.662 | 2.45 | -1.400 | 1.97 |
| 621.929 | 2.20 | -2.430 | 0.32 |
| 625.256 | 2.40 | -1.690 | 1.44 |
| 626.514 | 2.18 | -2.550 | 0.50 |
| 659.388 | 2.43 | -2.420 | 0.55 |
| 675.015 | 2.42 | -2.620 | 0.31 |

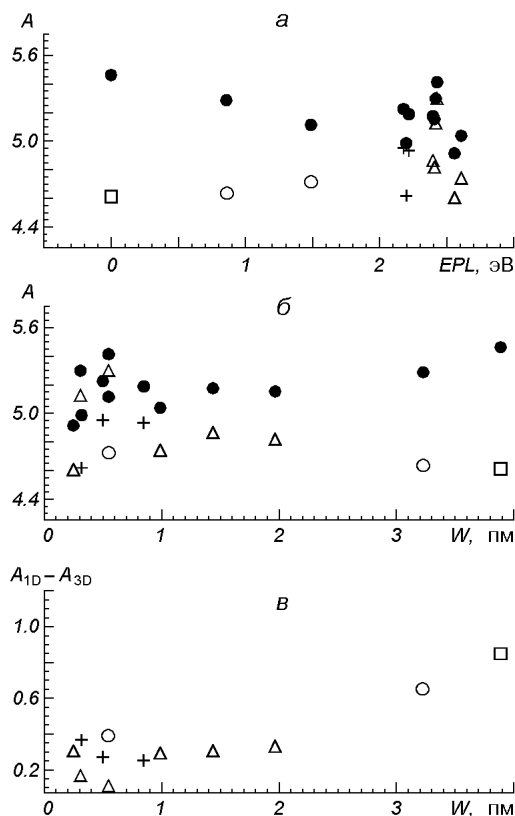


Рис. 3. Содержание железа при ЛТР в звезде HD 140283 в зависимости от потенциала возбуждения EPL нижнего уровня (а) и эквивалентной ширины W линий Fe I (б): светлые символы — 3D-модель, точки — 1D-модель Куруца; в — разности 1D- и 3D-содержаний. Список линий приведен в таблице

3. Эквивалентные ширины при переходе от ЛТР- к НЛТР-приближению становятся намного меньше.

СОДЕРЖАНИЕ ЖЕЛЕЗА

Содержание железа в звезде HD 140283 было найдено путем подгонки теоретических эквивалентных ширин W избранных линий Fe I к наблюдаемому. Значение содержания, при котором эти ширины совпадают, принималось за искомое. При расчете эквивалентных ширин поток, выходящий из звезды в рассматриваемой линии, измерялся в единицах потока в континууме. Наблюдения линий Fe I, были любезно предоставлены в наше распоряжение Р. Гарсиа Лопесом, К. Альенде и их коллегами [15]. Мы использовали 12 линий, входящих в нашу модель атома. Список линий и их характеристики приведены в таблице. Мы использовали т. н. «оксфордские» силы осцилляторов [28—32]. Определение содержания железа было выполнено в НЛТР- и ЛТР-приближениях для двух упомянутых выше моделей атмосфер. Результаты определения содержания представлены на рис. 3 и 4.

Из наших расчетов вытекает, что пренебрегать НЛТР-эффектами при определении содержания железа в звезде HD 140283 недопустимо. Средняя НЛТР-поправка к содержанию в 1D-модели составляет 0.58 dex. В 3D-модели она еще больше — 0.82 dex. При этом у сильных линий с низким потенциалом возбуждения ($EPL < 1$ эВ) в последнем случае НЛТР-поправка превышает 1 dex. При ЛТР ошибки, вызываемые пренебрежением неоднородной структурой атмосферы (рис. 3), достаточно велики (хотя и меньше, чем НЛТР-поправки). Средняя ошибка составляет 0.36 dex, что хорошо согласуется с результатами [19]. В целом учет неоднородности в рамках ЛТР ведет к уменьшению содержания железа в звезде HD 140283: если в 1D-модели $A_{Fe} = 5.186 \pm 0.156$, то в 3D-модели $A_{Fe} = 4.826 \pm 0.211$. Однако, если при расчете профилей линий Fe I принять во внимание НЛТР-эффекты, то разница между содержанием, полученным для 1D-модели, и содержанием для 3D-модели становится несущественной. Мы показываем эту разницу на рис. 4, в. Как видно, в среднем для 12 рассмотренных линий Fe I она не превышает 0.115 dex. При этом содержание заметно увеличивается по сравнению с ЛТР-случаем. Теперь в 1D-модели $A_{Fe} = 5.767 \pm 0.184$, и в 3D-модели $A_{Fe} = 5.652 \pm 0.170$.

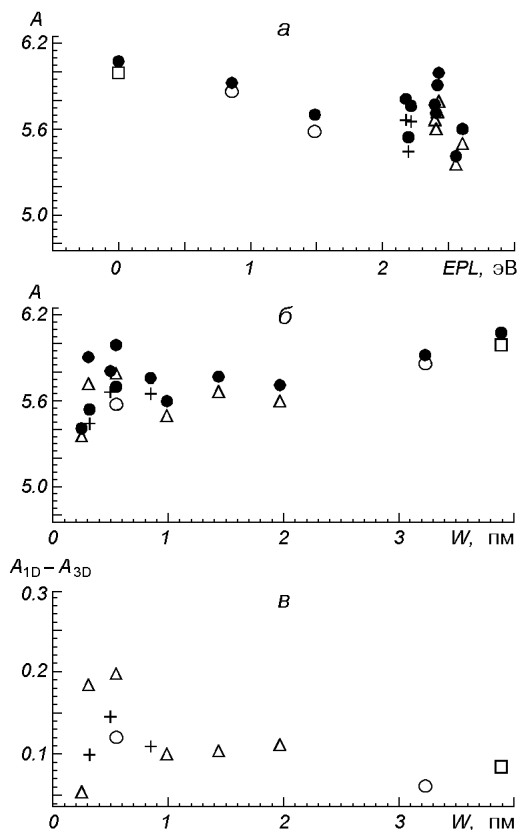


Рис. 4. То же, что на рис. 3, для случая НЛТР

Следует отметить, что наши оценки НЛТР-поправок к содержанию железа для рассмотренной 1D-модели звезды HD 140283 хорошо согласуются с результатами [71]. В то же время Граттон и др. [40] получили для этой звезды заметно меньшие поправки. Принимая во внимание, что основным механизмом заселения уровней Fe I в атмосфере HD 140283 является УФ-сверхионизация, причину указанного расхождения следует искать в способах расчета УФ-поля излучения. С одной стороны, Граттон и др. справедливо отмечают, что в металлодефицитных звездах гало, к которым относится рассматриваемая звезда, непрозрачность, создаваемая частотным линией слишком мала, чтобы повлиять на УФ-поток. С другой стороны, расхождения между наблюдаемым и рассчитанным потоком излучения в этой области они компенсируют введением дополнительной «эмпирической» непрозрачности. Это ведет к уменьшению избытка УФ-фотонов и, как следствие, к уменьшению НЛТР-эффектов. Такой подход вряд ли можно считать правомочным, особенно если принять во внимание, что истинные причины расхождения могут быть связаны, например, с пренебрежением неоднородной структурой атмосферы. Так называемый «теоретический» подход, предложенный Граттоном и др. [40] как альтернатива эмпирическому, вызвавшему возражения рецензента обсуждаемой статьи (о чем пишут Граттон и др. на с. 958 своей статьи), приводит к еще более нереальному решению, поскольку дает избыток атомов Fe I в атмосфере HD 140283. Данный результат противоречит современным представлениям о кинетике возбуждения и ионизации атома железа.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенные выше результаты нельзя рассматривать как окончательные, в первую очередь в силу пренебрежения эффектами горизонтального переноса излучения и непрозрачностью, вызванной частотным линией. Насколько могут измениться наши выводы, если мы учтем эти эффекты? Дискуссию на данную тему можно найти в работах [36, 73]. Мы полагаем, что учет частотного уменьшит УФ-сверхионизацию в гранулах; сглаживание в горизонтальном направлении поля излучения приведет к дальнейшему его уменьшению в гранулах, однако к некоторому увеличению — в межгранулах. Пространственно же усредненные профили останутся без изменения. Как следствие, содержание железа по-прежнему останется близким к значению, полученному в 1.5D-приближении. Принимая во внимание, что уровень шума при определении содержания в звездных атмосферах превышает 0.1 dex, мы приходим к следующему выводу: содержание Fe в звездах гало с дефицитом металлов, полученное как на основе 1D-, так и 3D-моделей атмосфер, практически совпадает, если при расчете профилей линий Fe I во внимание принимаются НЛТР-эффекты. Иными словами, исследованиям по определению содержания Fe в указанных звездах, основанным на применении 1D-моделей атмосфер, можно вполне доверять, если при расчете профилей линий Fe I во внимание принимаются НЛТР-эффекты.

1. Атрощенко И. Н. Трехмерные гидродинамические модели солнечной фотосферы // Кинематика и физика небес. тел.—1993.—9, № 1.—С. 3—15.
2. Бикмаев И. Ф., Бобринский С. С., Сахибуллин Н. А. Сверхионизация нейтрального железа в атмосферах субкарликов солнечного типа // Письма в астрон. журн.—1990.—16, вып. 2.—С. 91—95.
3. Боярчук А. А., Антипова Л. И., Боярчук М. Е., Саванов И. С. Сравнительный анализ содержания химических элементов в атмосферах красных гигантов различных возрастных групп // Астрон. журн.—2001.—78, № 4.—С. 349—358.
4. Боярчук А. А., Любимков Л. С., Сахибуллин Н. А. Эффекты отклонений от ЛТР в

- атмосферах F-гигантов. I. Повышение ионизации атомов Fe I // *Астрофизика*.—1985.—22, № 2.—С. 339—356.
5. *Гадун А. С.* Применение трехмерных моделей солнечной фотосферы для задач спектрального анализа. Линии Fe I и Fe II (центр диска) // *Кинематика и физика небес. тел.*—1994.—10, № 3.—С. 33—53.
 6. *Гадун А. С.* Двумерные модели атмосферы Солнца: влияние боковых граничных условий // *Кинематика и физика небес. тел.*—1998.—14, № 3.—С. 245—256.
 7. *Гадун А. С.* Двумерная нестационарная магнитогрануляция // *Кинематика и физика небес. тел.*—2000.—16, № 2.—С. 99—120.
 8. *Гадун А. С., Плонер С. П. О.* Двумерные модели атмосферы карлика гало с низким содержанием металлов. I. Анализ моделей // *Кинематика и физика небес. тел.*—1999.—15, № 1.—С. 3—16.
 9. *Гадун А. С., Плонер С. П. О.* Двумерные модели атмосферы карлика гало с низким содержанием металлов. II. ЛТР-содержание железа и лития // *Кинематика и физика небес. тел.*—1999.—15, № 1.—С. 17—24.
 10. *Костык Р. И.* Тонкая структура фраунгоферовых линий и строение атмосферы Солнца // *Астрон. журн.*—1985.—62, № 1.—С. 112—123.
 11. *Любимков Л. С., Боярчук А. А.* Влияние отклонений от ЛТР на определение микротурбулентности в атмосферах сверхгигантов класса F // *Астрофизика*.—1983.—19, № 4.—С. 683—696.
 12. *Стодилка М. И.* Пространственные вариации эквивалентных ширин линий нейтрального железа в солнечной грануляции // *Кинематика и физика небес. тел.*—2000.—16, № 4.—С. 291—302.
 13. *Щукина Н. Г.* Линии Fe I в спектрах холодных звезд: температурная диагностика атмосферы солнечного типа // *Кинематика и физика небес. тел.*—1998.—14, № 5.—С. 415—428.
 14. *Щукина Н. Г., Трухильо Буэно Н.* Линии Fe I в спектрах холодных звезд: не-ЛТР-эффекты в атмосфере солнечного типа // *Кинематика и физика небес. тел.*—1998.—14, № 4.—С. 315—329.
 15. *Allende Prieto C., Asplund M., Garcia Lopez R., et al.* Convection in metal-poor stars as traced from spectral line asymmetries // *Astron. Soc. Pac. Conf. Ser.*—1999.—173.—P. 205—208.—(Theory and Tests of Convection in Stellar Structure. Proc. 1st Granada Workshop / Eds A. Gimenez, E. Guinan, B. Montesinos).
 16. *Anstee S. D., O'Mara B. J.* Width cross-sections for collisional broadening of *s-p* and *p-s* transitions by atomic hydrogen // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—1995.—276, N 3.—P. 859—866.
 17. *Asplund M.* Line formation in solar granulation. III. The photospheric Si and meteoritic Fe abundances // *Astron. and Astrophys.*—2000.—359, N 2.—P. 755—758.
 18. *Asplund M., Ludwig H.-G., Nordlund È., Stein R.* The effects of numerical resolution on hydrodynamical surface convection simulations // *Astron. and Astrophys.*—2000.—359, N 2.—P. 669—681.
 19. *Asplund M., Nordlund È., Trampedach R., Stein R.* 3D hydrodynamical model atmospheres of metal-poor stars. Evidence for a low primordial Li abundance // *Astron. and Astrophys.*—1999.—346, N 1.—P. L17—L20.
 20. *Asplund M., Nordlund È., Trampedach R., et al.* Line formation in solar granulation. I. Fe line shapes, shifts and asymmetries // *Astron. and Astrophys.*—2000.—359, N 2.—P. 729—742.
 21. *Asplund M., Nordlund È., Trampedach R., Stein R.* Line formation in solar granulation. II. The photospheric Fe abundance // *Astron. and Astrophys.*—2000.—359, N 2.—P. 743—754.
 22. *Atroshchenko I. N., Gadun A. S.* Three-dimensional hydrodynamic models of solar granulation and their application to a spectral analysis problem // *Astron. and Astrophys.*—1994.—291, N 2.—P. 635—656.
 23. *Atroshchenko I. N., Gadun A. S., Kostik R. I.* Three-dimensional simulation of convective motions in the Procyon envelope // *Solar and stellar granulation / Eds R. J. Rutten, G. Severino.* — Dordrecht: Kluwer, 1989.—P. 521—531.—(NATO ASI Ser. C. 263).
 24. *Auer L. H., Fabiani-Bendicho P., Trujillo-Bueno J.* Multidimensional radiative transfer with multilevel atoms: I. ALI method with preconditioning of the rate equations // *Astron. and Astrophys.*—1994.—292, N 2.—P. 599—615.
 25. *Auer L. H., Heasley J. N., Milkey R. W.* A Computational method for the solution of non-LTE transfer problems by the complete linearization method // *Kitt Peak Nat. Observatory. Contrib.*—1972.—N 555.—183 p.
 26. *Barklem P. S., O'Mara B. J.* The broadening of *p-d* and *d-p* transitions by collisions with neutral hydrogen atoms // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—1997.—290, N 1.—P. 102—106.
 27. *Barklem P. S., O'Mara B. J., Ross J. E.* The broadening of *d-f* and *f-d* transitions by collisions with neutral hydrogen atoms // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—1998.—296, N 4.—P. 1057—1060.

28. *Blackwell D. E., Ibbetson P., Petford A.-D., Shallis M. J.* Precision measurement of relative oscillator strengths. IV. Attainment of 0.5 percent accuracy. Fe I transitions for levels a^5D_{0-4} (0.00—12 eV) // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—1979.—186, N 3.—P. 633—655.
29. *Blackwell D. E., Lynas-Gray A., Smith G.* On the determination of the solar iron abundance using Fe I lines // *Astron. and Astrophys.*—1995.—296, N 1.—P. 217—232.
30. *Blackwell D. E., Petford A. D., Shallis M. J.* Precision measurements of relative oscillator strengths — VI. Measures of Fe I transitions from a^5F_{1-5} (0.86—1.01 eV) with an accuracy of 0.5 per cent // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—1979.—186, N 3.—P. 657—668.
31. *Blackwell D. E., Petford A. D., Shallis M. J., Simmons G. J.* Precision measurements of relative oscillator strengths. VIII. Measures of backslash Fe I transitions from levels a^3F_{2-4} (1.49—1.61 eV) with an accuracy of 1 per cent // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—1980.—191, N 2.—P. 445—450.
32. *Blackwell D. E., Petford A. D., Simmons G. J.* Measurement of relative oscillator strengths for Fe I: transitions from levels b^3F_{2-4} (2.61 eV — 2.56 eV). Use of a multipass optical system // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—1982.—201, N 2.—P. 595—602.
33. *Carlsson M.* A computer program for solving multi-level non-LTE radiative transfer problems in moving or static atmospheres // *Uppsala Astron. Observatory.*—1986.—Rep. N 33.—39 p.
34. *Dravins D., Nordlund Ë.* Stellar Granulation. IV. Line formation in inhomogeneous stellar photospheres // *Astron. and Astrophys.*—1990.—228, N 1.—P. 184—202.
35. *Dravins D., Nordlund Ë.* Stellar Granulation. V. Synthetic spectral lines in disk-integrated starlight // *Astron. and Astrophys.*—1990.—228, N 1.—P. 203—217.
36. *Fabiani-Bendicho P., Trujillo-Bueno J.* Three dimensional radiative transfer with multilevel atoms // *Solar Polarization. Proc. International Workshop / Eds K. Nagendra, J. Stenflo.* — Dordrecht-Boston-London: Kluwer, 1999.—P. 219.
37. *Gadun A., Pavlenko Ya.* 1-D and 2-D model atmospheres: iron and lithium LTE abundances in the Sun // *Astron. and Astrophys.*—1997.—324, N 1.—P. 281—288.
38. *Gehren T., Reile C., Steenbock W.* Spectroscopic tests of late-type model atmospheres of dwarf stars // *Stellar Atmospheres: Beyond Classical models / Eds L. Grivellari, I. Hubeny, D. G. Hummer.* — Dordrecht: Kluwer, 1991.—P. 387—396.—(NATO ASI Ser. C 341).
39. *Gigas D.* The iron abundance of Vega // *Astron. and Astrophys.*—1986.—165, N 1.—P. 170—182.
40. *Gratton R. G., Caretta E., Eriksson K., Gustafsson B.* Abundances of light elements in metal-poor stars. II. Non-LTE abundance corrections // *Astron. and Astrophys.*—1999.—350, N 3.—P. 955—969.
41. *Grevesse N., Sauval A. J.* The solar abundance of iron and the photospheric model // *Astron. and Astrophys.*—1999.—347, N 1.—P. 348—354.
42. *Israelian G., Rebolo R., Lopez R. G., et al.* Oxygen in the very early Galaxy // *Astrophys. J.*—2001.—551, N 3.—P. 833.
43. *Khomenko E. V., Kostik R. I., Shchukina N. G.* Five-minute oscillations above granules and intergranular lanes // *Astron. and Astrophys.*—2001.—369., N 2.—P. 660—671.
44. *Kiselman D.* Formation of Li I lines in photospheric granulation. // *Astrophys. J. Lett.*—1997.—489, N 2.—P. L107—L110.
45. *Kiselman D., Asplund M.* Spatially resolved solar lines as diagnostics of NLTE effects // *Astron. Soc. Pac. Conf. Ser.*—2001.—CS-223.—CD-684.—(Stellar Systems and the Sun. Proc. 11th Cambridge Workshop on Cool Stars / Eds R. Garcia Lopez, R. Rebolo, M. Zapatero Osorio).
46. *Kostik R. I., Shchukina N. G., Rutten R. J.* The solar iron abundance of iron: not the last word // *Astron. and Astrophys.*—1996.—305, N 1.—P. 325—342.
47. *Kurucz R. L.* «Finding» the «mission» solar ultraviolet opacity // *Rev. mex. astron. y astrofis.*—1992.—23, N 1.—P. 181—186.
48. *Lambert D., Heath J. E., Lemke M., Drake J.* The chemical composition of field RR Lyrae stars. I. Iron and calcium // *Astrophys. Space. Sci.*—1996.—103, N 1.—P. 183—210.
49. *Lemke M.* Abundance anomalies in main sequence A stars. I. Iron and titanium // *Astron. and Astrophys.*—1989.—225, N 1.—P. 125—136.
50. *Lites B. W., Cowley C. R.* Fe I line formation in solar-type giants and dwarfs // *Astron. and Astrophys.*—1974.—31, N 4.—P. 361—369.
51. *Magain P., Zgao G.* Empirical study of departures from the excitation equilibrium of Fe I in metal-poor stars // *Astron. and Astrophys.*—1996.—305., N 1.—P. 245—254.
52. *Nave G., Johansson S., Learner R. C. M., et al.* A new multiplet table for Fe I // *Astrophys. J. Suppl. Ser.*—1994.—94, N 1.—P. 221—459.
53. *Nordlund Ë.* Numerical simulations of the solar granulation. I. Basic equations and methods // *Astron. and Astrophys.*—1982.—107, N 1.—P. 1—10.
54. *Nordlund Ë.* Solar convection // *Solar Phys.*—1985.—100, N 1.—P. 209—235.
55. *Nordlund Ë.* NLTE spectral line formation in three dimensions // *Stellar Atmospheres: Beyond*

- Classical models / Eds L. Grivellari, I. Hubeny, D. G. Hummer. — Dordrecht: Kluwer, 1991.—P. 61—68.—(NATO ASI Ser. C341).
56. Nordlund \ddot{E} ., Dravins D. Stellar granulation. III. Hydrodynamic model atmospheres // *Astron. and Astrophys.*—1990.—228, N 1.—P. 155—183.
 57. Nordlund \ddot{E} ., Stein R. F. 3-D simulations of solar and stellar convection and magnetoconvection // *Comp. Phys. Comm.*—1990.—59, N 1.—P. 119—125.
 58. Rentzsch-Holm I. Non-LTE abundance corrections of iron and carbon in A-type and related stars // *Astron. and Astrophys.*—1996.—312, N 3.—P. 966—972.
 59. Rodriguez Idalgo I., Ruiz Cobo B., Collados M., del Toro Iniesta J. C. Granular and intergranular model atmospheres from inversion of solar two-dimensional spectroscopic data // *Astron. Soc. Pac. Conf. Ser.*—1999.—173.—P. 313.—(Theory and Tests of Convection in Stellar Structures / Eds E. Gimenez, E. Guinan, B. Montesinos).
 60. Ruland F., Holweger H., Griffin R., et al. Spectroscopic analysis of Pollux relative to the Sun with special reference to Arcturus // *Astron. and Astrophys.*—1980.—92, N 1/2.—P. 70—85.
 61. Rutten R. J. The NLTE formation of iron lines in the solar spectrum // *Physics of formation of Fe II lines outside LTE. IAU Colloquium N 94 / Eds R. Viotti, A. Vittone, M. Friedjung* Dordrecht: Reidel, 1988.—P. 185—210.
 62. Sanchez J., Ruiz Cobo B., del Toro Iniesta J. C. Heights of formation for measurements of atmospheric parameters // *Astron. and Astrophys.*—1996.—314, N 1.—P. 295—302.
 63. Shchukina N. G., Trujillo-Bueno J. Is LTE a suitable approximation for FeI-based diagnostics of the thermal structure of sunspots? // *Astron. Soc. Pac. Conf. Ser.*—1997.—118.—P. 207—211.—(First Advances in Solar Physics Euroconference: Advances in the Physics of Sunspots / Eds B. Schmieder, J. C. del Toro Iniesta, M. Vazquez).
 64. Shchukina N. G., Trujillo Bueno J. The iron line formation problem in three-dimensional hydrodynamical models of solar-like photospheres // *Astrophys. J.*—2001.—550, N 3.—P. 970.
 65. Socas Navarro H., Trujillo-Bueno J. Linearization versus preconditioning: Which approach is the best for solving multilevel transfer problems? // *Astrophys. J.*—1997.—490, N 1.—P. 383—392.
 66. Socas-Navarro H., Trujillo Bueno J., Ruiz Cobo B., Shchukina N. G. Are NLTE effects important for the inversion of iron lines? // *JOSO Annual Report-96 / Ed. M Saniga.* — Astronomical Institute, Slovak Academy of Sciences, 1997.—P. 86—88.
 67. Steenbock W. Statistical equilibrium of Fe I/Fe II in cool stars // *Cool stars with excesses of heavy elements / Eds M. Jaschek, P. Keenan.* — Dordrecht-Boston: Reidel, 1985.—P. 231—235.
 68. Stein R. F., Nordlund \ddot{E} . Topology of convection beneath the solar surface // *Astrophys. J. Lett.*—1989.—342, N 1.—P. L95—L98.
 69. Stein R., Nordlund \ddot{E} . Simulations of solar granulation. I. General properties // *Astrophys. J.*—1998.—499, N 3.—P. 914—933.
 70. Takeda Y. Study on the non-LTE effect of Fe in stellar atmospheres: application to Arcturus // *Astron. and Astrophys.*—1991.—242, N 2.—P. 455-473.
 71. Thevenin F., Idiart T. P. Stellar iron abundances: non-LTE effects // *Astrophys. J.*—1999.—521, N 2.—P. 753—763.
 72. Trujillo-Bueno J., Fabiani-Bendicho P. A novel iterative scheme for the very fast and accurate solution of non-LTE radiative transfer problems // *Astrophys. J.*—1995.—455, N 2.—P. 646—657.
 73. Uitenbroek H. The effect of photospheric granulation on the determination of the lithium abundance in solar-type stars // *Astrophys. J.* 1998.—498, N 1.—P. 427—440.

Поступила в редакцию 15.05.03