

УДК 523.9

В. А. Шеминова, А. С. Гадун

Главная астрономическая обсерватория НАН Украины
03680 Киев ГСП, ул. Академика Заболотного 27

Конвективные сдвиги линий железа в фотосфере Солнца

Исследуется влияние конвективной структуры солнечной фотосферы на сдвиги спектральных линий железа. На основании нестационарных 2-мерных ГД-моделей атмосферы были синтезированы профили линий в видимом и ИК-диапазоне спектра. Полученные зависимости сдвигов этих линий от потенциала возбуждения, длины волны и силы линии были проанализированы совместно с депрессионными функциями вклада. Найдено, что величина сдвигов линий обусловлена различием вкладов центральных частей гранулы и межгранульных промежутков. В глубоких слоях фотосферы, где образуются слабые и умеренные линии, основной вклад в поглощение пространственно неразрешенной линии дают только центральные части гранул с восходящими потоками, а вклад межгранульных промежутков мал. В высоких слоях фотосферы, где формируются сильные линии, находится зона проникающей конвекции, в которой физические условия существенно отличаются. Вследствие этого существенно увеличен вклад межгранульных промежутков с нисходящими движениями, а вклад центральных частей гранул уменьшен. Этим объясняется наблюдаемое «покраснение» голубых сдвигов сильных линий. В ИК-линиях относительно малые конвективные голубые сдвиги обусловлены тем, что из-за сильной непрозрачности в этой области спектра эффективно поглощающие области располагаются выше в фотосфере и значительно больше простираются в область проникающей конвекции. Для видимых и синтезированных ИК-линий также вычислены эффективные глубины образования и представлены их зависимости от основных параметров спектральной линии.

КОНВЕКТИВНІ ЗМІЩЕННЯ ЛІНІЙ ЗАЛІЗА У ФОТОСФЕРІ СОНЦЯ, Шеминова В. А., Гадун О. С. — Досліджується вплив конвективної структури сонячної фотосфери на зміщення спектральних ліній заліза. На основі нестационарних 2-вимірних ГД-моделей фотосфери були синтезовані профілі ліній у видимому та ІЧ-діапазоні спектру. Отримані залежності зміщень цих ліній від потенціалів збудження, довжини хвилі і сили лінії були проаналізовані разом з депресійними функціями вкладу. Знайдено, що величина зміщень ліній зумовлена різницею вкладів від центральних частин гранул та від міжгранульних проміжків. У глибоких шарах фотосфери, де утворюються слабкі та помірні лінії, основний вклад

дають тільки центральні області гранул із висхідними потоками, а вклад міжгранульних проміжків малий. У високих шарах фотосфери, де утворюються сильні лінії, знаходиться зона проникаючої конвекції, в якій фізичні умови суттєво відрізняються. Завдяки цьому значно збільшеним є вклад міжгранульних проміжків з низхідними потоками і зменшеним — вклад центральних областей гранул. Цим пояснюються спостережені «почервоніння» голубих зміщень сильних ліній. Для ІЧ-ліній відносно малі конвективні голубі зміщення зумовлені тим, що завдяки високій непрозорості в цій частині спектру ефективно поглинаючі ділянки розміщуються вище у фотосфері і все більше займають область проникаючої конвекції. Для видимих та синтезованих ІЧ-ліній також розраховані ефективні висоти утворення та побудовані їхні залежності від основних параметрів лінії.

CONVECTIVE SHIFTS OF IRON LINES IN THE SOLAR PHOTOSPHERE, by Sheminova V. A., Gadun A. S. — The influence of a convective structure of the solar photosphere on the shifts of spectral iron lines was studied. Based on the 2-D time-dependent HD solar model atmosphere, we synthesized the line profiles in the visual and infrared spectral ranges. The dependence of the lines shifts on excitation potential, wavelength, and line strength was analyzed in combination with the depression contribution functions. The magnitude of line shifts was found to depend on the difference between the contributions from central parts of granules and from intergranular lanes. Deep in the photosphere the central areas with upflows give the main contribution in the absorption of spatially unresolved weak and moderate lines. The contribution from intergranular lanes is small for these lines. In the upper solar photosphere layers the convective overshooting region is located, and the physical conditions drastically change there. As a result, the line depression contribution from intergranular lanes with downflows grows significantly, while the contributions from the central areas of granules become smaller. This is the reason why blue line shifts decrease and become red, in particular for the strong photospheric lines, which are completely formed in the convective overshooting region. The convective blueshifts observed in infrared lines are smaller than in the visual spectral range because the effective absorption layers are located higher in the photosphere and extend further into the convective overshooting region due to a greater opacity in the infrared range. We also calculated the effective formation depth of visual and infrared synthetic lines, and their dependence on main line parameters is illustrated.

ВВЕДЕНИЕ

Фраунгоферовые линии, наблюдаемые в центре диска Солнца, из-за движения системы Солнце—Земля смещаются по сравнению с лабораторными в сторону больших длин волн (красный сдвиг). Если учесть гравитационный красный сдвиг (636 м/с), вызванный разностью гравитационных потенциалов солнечной атмосферы и Земли, то большее число солнечных линий будут смещены в сторону коротких волн относительно лабораторных (голубой сдвиг). Согласно результатам, полученным в работах [1, 9, 11—13, 26, 28, 32], величина голубых сдвигов солнечных линий железа, измеренных с точностью до 100 м/с, находится в пределах от 0 до 1 км/с и в среднем равна 300—400 м/с. С увеличением высоты образования спектральной линии голубой сдвиг уменьшается. Об этом свидетельствует зависимость сдвигов линий от их потенциалов возбуждения EP . Для слабых линий с высокими значениями EP наблюдаются наибольшие голубые сдвиги, а для

сильных линий — наименьшие. Для некоторых сильных линий видимого диапазона обнаружен небольшой красный сдвиг, а для линий в области $\lambda\lambda = 195\text{...}200$ нм красный сдвиг достигает значительных величин (около 1 км/с [32]). Тенденция «покраснения» голубых сдвигов замечена также в активных областях фотосферы [1, 11]. Наблюдаемые голубые сдвиги слабых и умеренных линий можно объяснить уменьшением с высотой скорости конвективных движений, направленных вдоль луча зрения к наблюдателю [12, 13]. Область формирования сильных фотосферных линий простирается в слои проникающей конвекции, где нарушается классическая картина конвекции. Вещество центральных частей конвективных ячеек становится холоднее, чем в опускающихся межгранульных промежутках, но еще продолжает двигаться вверх. Яркость больше не коррелирует со сдвигами линий. Обратная корреляция яркости и сдвигов была обнаружена в ядрах очень сильных линий видимого диапазона и в ИК-линиях [22]. В процессе моделирования звездной грануляции в работе [27] было продемонстрировано проявление проникающей конвекции в высоких слоях солнечной фотосферы, которое и названо причиной наблюдаемых красных сдвигов линий.

Цель нашей работы — изучить влияние проникающей конвекции на условия формирования пространственно неразрешенных спектральных линий, выяснить роль гранул и межгранульных промежутков в образовании спектральных линий, установить причину «покраснения» голубых сдвигов сильных линий. Сегодня такая задача может быть решена благодаря значительному прогрессу в моделировании солнечной грануляции и ее эволюции [10, 14, 27, 30, 33], а также успешному внедрению в практику концепции депрессионных функций вклада [19, 20, 23, 25]. Воспользовавшись двумерными гидродинамическими моделями солнечной фотосферы [18], мы синтезировали линии Fe I и вычислили их сдвиги. С помощью функций вклада исследовали области образования линий в конвективной ячейке и проанализировали влияние физических условий гранульной структуры фотосферы на величину сдвигов синтезированных линий.

ГД-МОДЕЛЬ СОЛНЕЧНОЙ ГРАНУЛЯЦИИ

Недавно А. С. Гадуном была получена серия как одномасштабных, так и многомасштабных двумерных нестационарных гидродинамических моделей солнечной грануляции [2, 18], которые неоднократно применялись им для синтеза фотосферных линий [3—8, 15—17]. Эти модели удовлетворительно воспроизводят наблюдаемые проявления конвективных движений. Они достаточно хорошо описывают асимметричность и смещения линий. Сравнение результатов анализа синтезированных профилей, полученных с трех- и двумерными ГД-моделями [2], показало, что одномасштабные двумерные модели уступают в воспроизведении наблюдаемой асимметрии линий трехмерным моделям вследствие более узкого спектра неоднородностей. Тем не менее, применение двумерных моделей [18] для синтеза спектральных линий проще, чем более реальных трехмерных моделей и не лишено смысла, так как позволяет быстрее получить информацию для качественного понимания процессов в сверхадиабатических областях фотосферы Солнца и звезд солнечного типа.

Ниже для расчета спектральных линий использовалась последовательность ГД-моделей, в которых детальный лучистый перенос энергии рассматривался с учетом зависящего от частоты монохроматического коэффициента поглощения, а также поглощения в частотах атомарных и молекулярных линий в рамках концепции ODF [24]. Число точек по частоте при решении

уравнения лучистого равновесия было равным 239. Термическая конвекция в солнечной оболочке трактовалась как квазистационарная с единственным в моделируемой области конвективным потоком, который и представлял единственный масштаб грануляции.

Для построения ГД-моделей были приняты следующие предположения: 1) конвективные потоки квазистационарны во времени, а конвективные ячейки не изменяют своих горизонтальных размеров в течение своей эволюции; 2) конвективные цилиндры всегда простираются до самых больших глубин, допустимых моделируемой областью (1100 км ниже уровня поверхности в моделях). Эти модели были названы автором как SS-модели (steady-stable models). Размер расчетной области с горизонтальным и вертикальным размерами 1400 × 1960 км (800 км составляют атмосферные слои). Пространственный шаг составлял 28 км. Общая продолжительность моделирования — 50 мин реального солнечного времени с временным шагом 30 с между моделями.

Тестовые расчеты показали, что такой продолжительности моделирования достаточно для корректного учета пятиминутных осцилляций при расчетах спектральных линий. Данная временно-зависимая последовательность содержит 100 двумерных моделей для центра диска Солнца, состоящих из 48 колонок вдоль луча зрения.

Более детальное описание двумерных моделей такого типа можно найти в статьях [3, 18].

СИНТЕЗ СПЕКТРАЛЬНЫХ ЛИНИЙ

Для выявления зависимостей сдвигов линий от основных параметров линии были специально подобраны искусственные линии Fe I. Центральные глубины, потенциалы возбуждения нижнего уровня и длины волн искусственных линий задавались в широком диапазоне реальных значений линий Fe I. Затем для каждой линии по ее заданной центральной глубине, подбирались значения произведения содержания и сил осцилляторов Agf . Синтез этих линий с использованием временно-зависимой последовательности двумерных SS-моделей выполнялся в ЛТП-приближении путем 1.5-мерного решения уравнений переноса. Это значит, что для каждой колонки всех моделей вычислялся профиль спектральной линии как для плоскопараллельной атмосферы. Полученные профили усреднялись сначала по всем 48 колонкам в каждой модели, а потом по всем 100 моделям. В результате мы получили усредненный по пространству и по времени профиль линии. Центральная длина волны этого синтезированного профиля λ_{SS} определялась с помощью согласования полинома четвертого порядка с формой ядра профиля линии. Ошибка такого определения не превышает ± 50 м/с. Сдвиг синтезированной линии относительно исходного значения центральной длины волны λ_0 с учетом гравитационного сдвига вычислялся в единицах лучевых скоростей по известной формуле $V_R = c(\lambda_{SS} - \lambda_0)/\lambda_0 - 2.12 \cdot 10^{-6}c$, где c — скорость света. Тестовые вычисления показали, что величина сдвига линии, синтезированной с временно-зависимой последовательностью SS-моделей, состоящей из 100 моделей, незначительно отличается от сдвига линии, вычисленной с усредненной по времени SS-моделью. Это позволило нам значительно сократить вычисления. В дальнейшем мы использовали только усредненную SS-модель. Для каждой колонки этой модели вычисляли профиль линии и одновременно для каждой точки профиля вычисляли депрессионную функцию вклада и эффективную высоту образования как средневзвешенное значение по этой функции вклада. Затем, усреднив все

профили, мы получили соответственно усредненный профиль линии. Таким же способом мы получили для каждой точки профиля усредненной линии усредненные функции вклада и высоты формирования.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ВЫЧИСЛЕНИЙ ЛИНИЙ ВИДИМОГО ДИАПАЗОНА

Из рис. 1, где представлены конвективные сдвиги синтезированных линий Fe I в зависимости от длины волны, силы линии и высоты формирования, следует, что тенденции зависимостей вычисленных сдвигов линий аналогичны наблюдаемым [1, 9, 13]. Слабые линии в более коротковолновом участке с высокими EP имеют наибольший голубой сдвиг. Красный сдвиг четко проявляется у сильных линий, центральные глубины которых формируются наиболее высоко в фотосфере. Наибольший красный сдвиг присущ сильным, узким линиям видимого диапазона с параметрами $d = 0.8$, $W = 8$ пм и $\lambda = 600$ нм. Мы также получили четкую зависимость сдвигов от длины волны (рис. 1, a), хотя в работе [9] такой зависимости не найдено, по-видимому потому, что она строилась без учета различий в центральных глубинах наблюдаемых линий. В видимом диапазоне для умеренных и сильных линий зависимость величины сдвигов от длины волны наиболее резкая и значительно ослабевает для слабых линий ($d < 0.3$). В общем, величина голубых сдвигов уменьшается с увеличением длины волны, силы линий и эффективной высоты образования линий.

Для интерпретации полученных зависимостей сдвигов синтезированных линий мы построили на рис. 2 вертикальный разрез моделируемой конвективной ячейки (усредненная по времени двумерная SS-модель). Изотермы (штриховые линии), демонстрирующие температурное распределение, отчетливо указывают область температурной инверсии фотосферных слоев, которая расположена выше уровня 200 км. Эту область называют областью проникающей конвекции. Здесь изотермы, выпуклые над центром гранулы, становятся вогнутыми. Поле скоростей, обозначенное стрелками, дает наглядную картину движений в моделируемой ячейке: восходящие вертикальные потоки в центральной области и нисходящие по краям ячейки. Центральную область конвективной ячейки мы будем называть гранулой, а область с нисходящими движениями — межгранульными промежутками, как это было принято для наблюдаемой грануляционной структуры фотосферы. Кроме этих областей, в конвективной ячейке можно также выделить область, которая находится между центром и краями ячейки с преимущественно горизонтальными потоками вещества. На фоне вертикального разреза моделируемой ячейки контурами функций вклада обозначены четыре области формирования депрессии (d_c) в ядрах синтезированных линий. Жирной сплошной линией отмечен контур, который очерчивает область эффективного вклада, т. е. вклад депрессии здесь не меньше, чем $0.5CF_{\max}$. Внутри этого контура находятся контуры максимального вклада $0.75CF_{\max}$, а вне — еще два контура с вкладами $0.25CF_{\max}$, $0.1CF_{\max}$. Здесь CF_{\max} — максимальное значение функции вклада среди вычисленных для всей моделируемой области. Самый внешний контур показывает, что вне его поглощение в данной линии уже практически не влияет на выходящую интенсивность в центре усредненного профиля. Мы специально вычислили контуры функций вклада для спектральных линий с различными значениями параметров EP , d , λ , чтобы продемонстрировать изменения расположений областей формирования ядер синтезированных линий в конвективной ячейке.

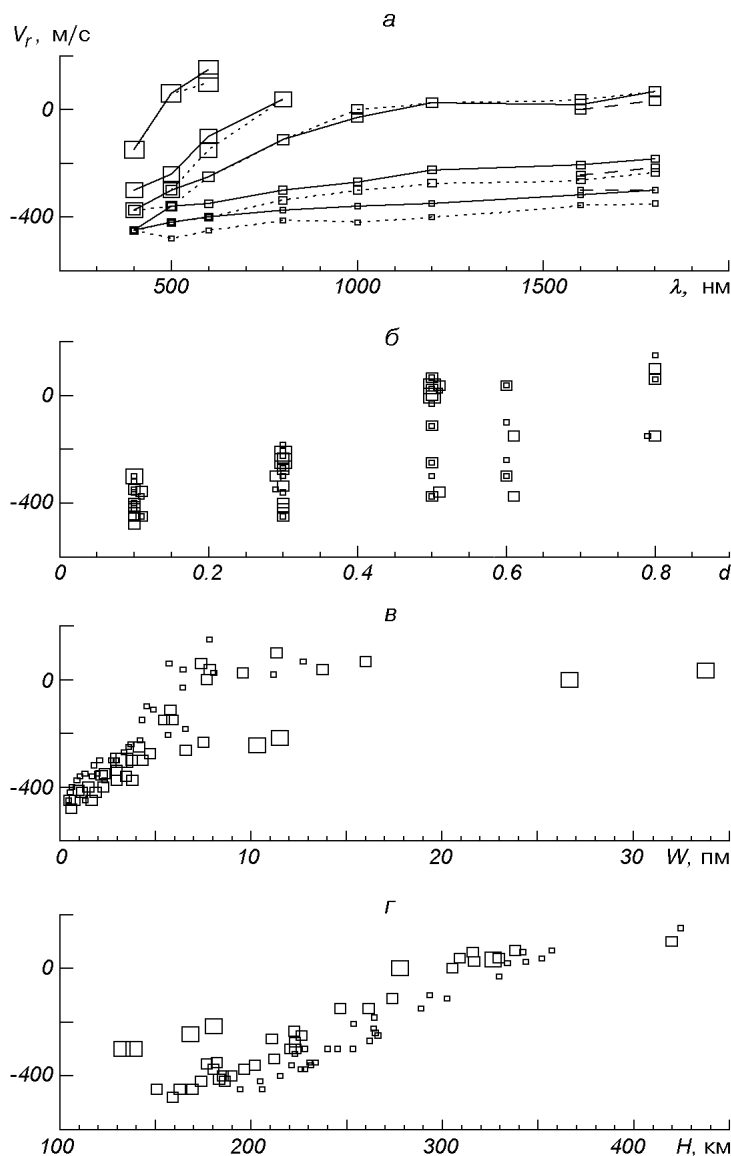


Рис. 1. Зависимости конвективных сдвигов синтезированных линий Fe I от длины волны (а), центральной глубины (б), эквивалентной ширины (в) и высоты формирования (г). Сплошные линии — $EP = 2.5$ эВ, пунктирные — $EP = 4.25$ эВ, штриховые — $EP = 6.4$ эВ. Размер квадратиков увеличивается с увеличением: а — силы линии $d = 0.1, 0.3, 0.5, 0.6, 0.8$; б, в, г — значений $EP = 2.5, 4.25, 6.4$ эВ

Рис. 2, а, б показывает, что область эффективного вклада (жирный контур) для слабой линии ($d_c = 0.1$) расположена ниже уровня 200 км, а для сильной линии ($d_c = 0.8$) — выше. Это указывает на то, что депрессия сильной линии происходит в основном в области проникающей конвекции, где физические условия фотосферных слоев существенно изменяются. Видно, что температура и скорости восходящего потока в центре гранулы уменьшаются, в то время как в межгранульных областях температура увеличивается. Все четыре контуры вклада, вычисленные для сильной линии, становятся более узкими в центре гранулы и широкими — по ее

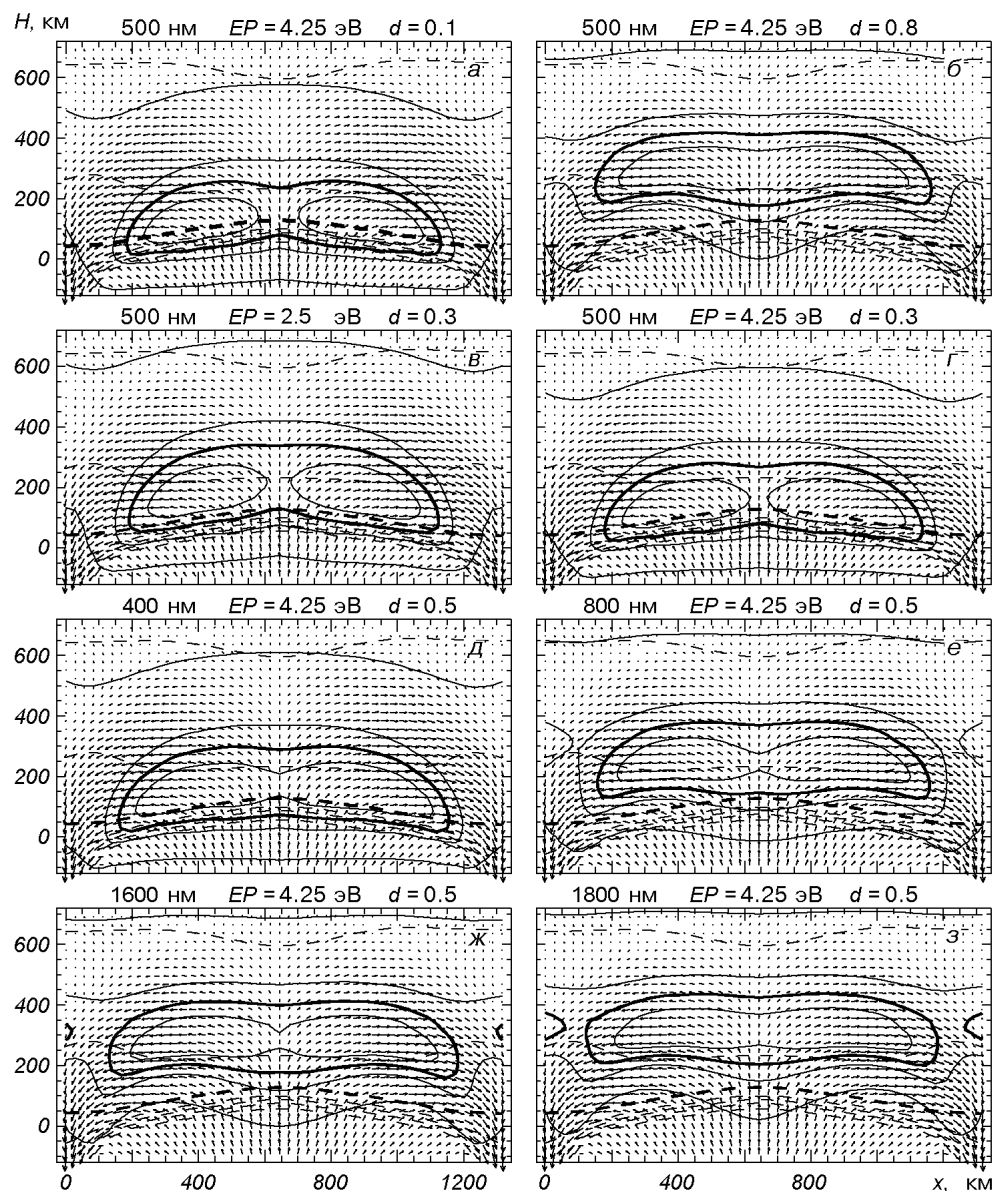


Рис. 2. Контуры депрессионных функций вклада (сплошные линии) на фоне вертикального разреза моделируемой конвективной ячейки для различных синтезированных линий Fe I: слабой и сильной (а, б); с низким и высоким потенциалом возбуждения (в, г); с различными длинами волн (д—з). Штриховые линии — изотермы (сверху вниз: 4000, 5000, 6000, 7000, 8000, 9000, 10000 К), жирная штриховая линия — уровень поверхности, где Росселандова оптическая толщина равняется единице. Стрелки указывают направления и амплитуды скоростей

краям. Межгранульные промежутки с нисходящими потоками вещества играют существенную роль в образовании депрессии в ядре сильной линии. Рис. 2, в, г показывает, как для двух равных по силе линий (0.3) с увеличением EP форма контуров остается практически без изменений, но расположение их становится более глубоким в фотосфере. Рис. 2, д—з отражают зависимость контуров вклада от длины волны умеренной линии

(0.5). С увеличением λ эффективный контур, как и в случае сильной линии, становится уже, выше и шире на фоне вертикального разреза моделируемой грануляционной ячейки. Линии с длинами волн около $\lambda = 800$ нм уже частично формируются в зоне проникающей конвекции, а линии $\lambda\lambda = 1600$ — 1800 нм — почти полностью, причем для ИК-линий вклады из межгранульных промежутков еще выше. Из рис. 2, з видно, как новые области эффективного вклада появляются в межгранульных промежутках.

Итак, построенные на фоне вертикального разреза конвективной ячейки контуры вклада в депрессию усредненных линий отчетливо продемонстрировали различное участие межгранульных областей в образовании линий поглощения.

Кроме функций вклада также представляют интерес вычисленные для каждой колонки моделируемой ячейки профили линий, которые являются составляющими усредненного профиля. Чтобы не загромождать рисунок, из всех 48 профилей мы выбрали наиболее характерные, образующиеся в межгранульных промежутках (профиль из 1-й колонки), в областях с преимущественно горизонтальными движениями (профиль из 12-й колонки) и в центральных частях гранулы (профиль из 24-й колонки). На рис. 3 показаны эти профили, а также высоты их формирования, которые в свою очередь представляют профили высот. Следует отметить довольно сложные профили высот в случае используемых неоднородных моделей по сравнению с однородными моделями фотосферы с постоянной микротурбулентной скоростью. В рамках однородных моделей профили высот всегда аналогичны профилю спектральной линии, т. е. полностью симметричны.

Как следует из наших вычислений, в наблюдениях спектров с высоким пространственным разрешением мы должны обнаружить три характерных типа профилей спектральной линии в зависимости от наблюдаемой области гранулы.

I тип — профили центральной области грануляционной ячейки имеют слабую асимметрию и голубые сдвиги.

II тип — профили области гранул с преимущественно горизонтальными движениями вещества имеют слабую асимметрию и практически несмещенные. По силе и ширине они незначительно отличаются от профилей I типа.

III тип — профили межгранульных областей имеют сильную асимметрию и большие красные сдвиги. По сравнению с I и II типами они более ослаблены в ядре и значительно расширены.

Такая классификация профилей мало зависит от основных параметров линии. При изменении этих параметров слегка изменяется форма и смещение профиля, но основные черты каждого типа сохраняются. В реальных наблюдениях с очень высоким пространственным и спектральным разрешением [21] уже были получены профили линий в очень ярких, средних по яркости и темных областях фотосферной грануляции. По форме и смещению они полностью соответствуют профилям трех типов, выделенных нами. Это подтверждает в некоторой степени достоверность наших вычислений с использованием двумерных ГД-моделей.

Интерпретируя спектры с низким пространственным разрешением, как это еще часто встречается в наблюдениях солнечных и в особенности звездных спектров, важно знать, как зависит форма усредненного профиля от условий формирования. Воспользовавшись данными наших вычислений, нетрудно выполнить такой анализ. На рис. 3, а, б усредненный профиль по всей моделируемой области представлен сплошной линией. Сравнение усредненного профиля слабой линии с I, II и III типами профилей показывает, что максимальный вклад в ядро усредненного профиля слабой

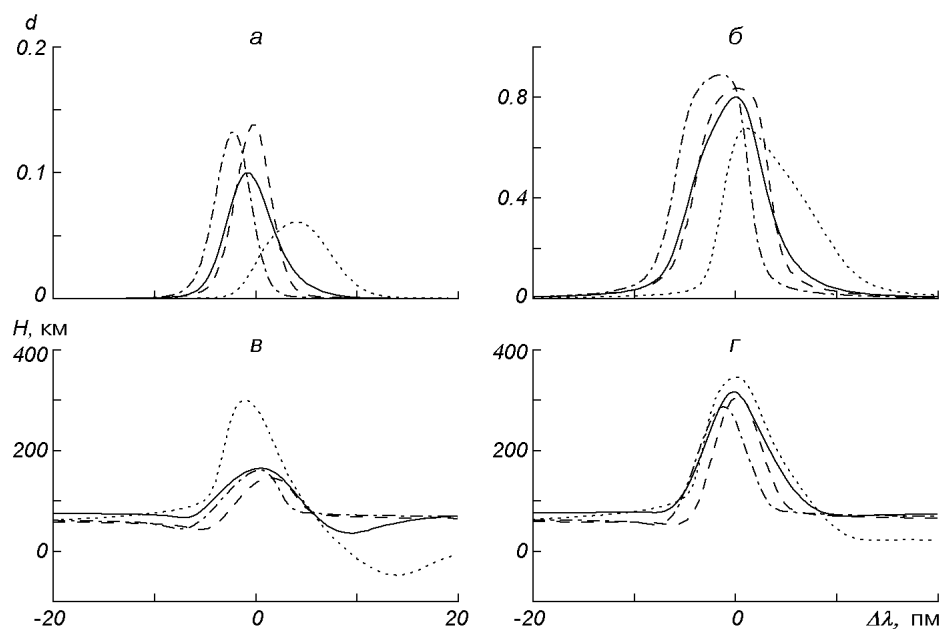


Рис. 3. Изменения формы профилей линий, вычисленных в характерных областях конвективной ячейки для слабой (*a*) и сильной (*б*) линии близ $\lambda = 500$ нм при $EP = 4.25$ эВ. Сплошная линия — усредненный профиль, штрих-пунктир — профиль I типа из центральной области, штрих — профиль II типа из области с горизонтальными движениями, пунктир — профиль III типа из межгранульных промежутков; *в*, *г* — эффективные высоты формирования профилей *a*, *б* соответственно

линии (рис. 3, *a*) несут профили I и II типа, т. е. почти вся область гранулы вплоть до межгранульных промежутков. Вклад профилей III типа с межгранул в усредненный профиль слабой линии отражается только на красном крыле линии, которое становится более протяженным и тем самым усиливает асимметрию профиля в далеких крыльях. Голубое крыло усредненного профиля слабой линии, как и ядро линии, в основном состоит из профилей I и II типа. Из этого следует, что смещение ядра и форма голубого крыла слабой линии в основном контролируется восходящими движениями центральных частей гранул, а на форму красного крыла также влияют нисходящие движения в межгранулах. Эффективные высоты формирования ядра и крыльев усредненного профиля можно оценить из профиля высот (рис. 3, *в*). Для ядра это уровень около 140—160 км, для голубого крыла — 80—140 км и для красного крыла — 50—140 км. Умеренная линия ($d = 0.5$) отличается от рассмотренной выше слабой линии в основном уровнем эффективных высот формирования профиля линии. Он расположен выше на 100 км. Все остальные детали формирования остались похожими. Для сильной линии ($d = 0.8$, рис. 3, *б*) характерно значительное усиление профилей III типа из межгранульных промежутков и увеличение их асимметричности вследствие понижения температуры в высоких слоях гранулы. Все это приводит к изменению формы и асимметрии усредненного профиля сильной линии и к значительному уменьшению голубого смещения ядра линии. Как видно из рис. 3, *г*, формирование ядра сильной линии происходит в области проникающей конвекции на высотах 280—350 км.

Из выполненного анализа формы и смещений профилей синтезирован-

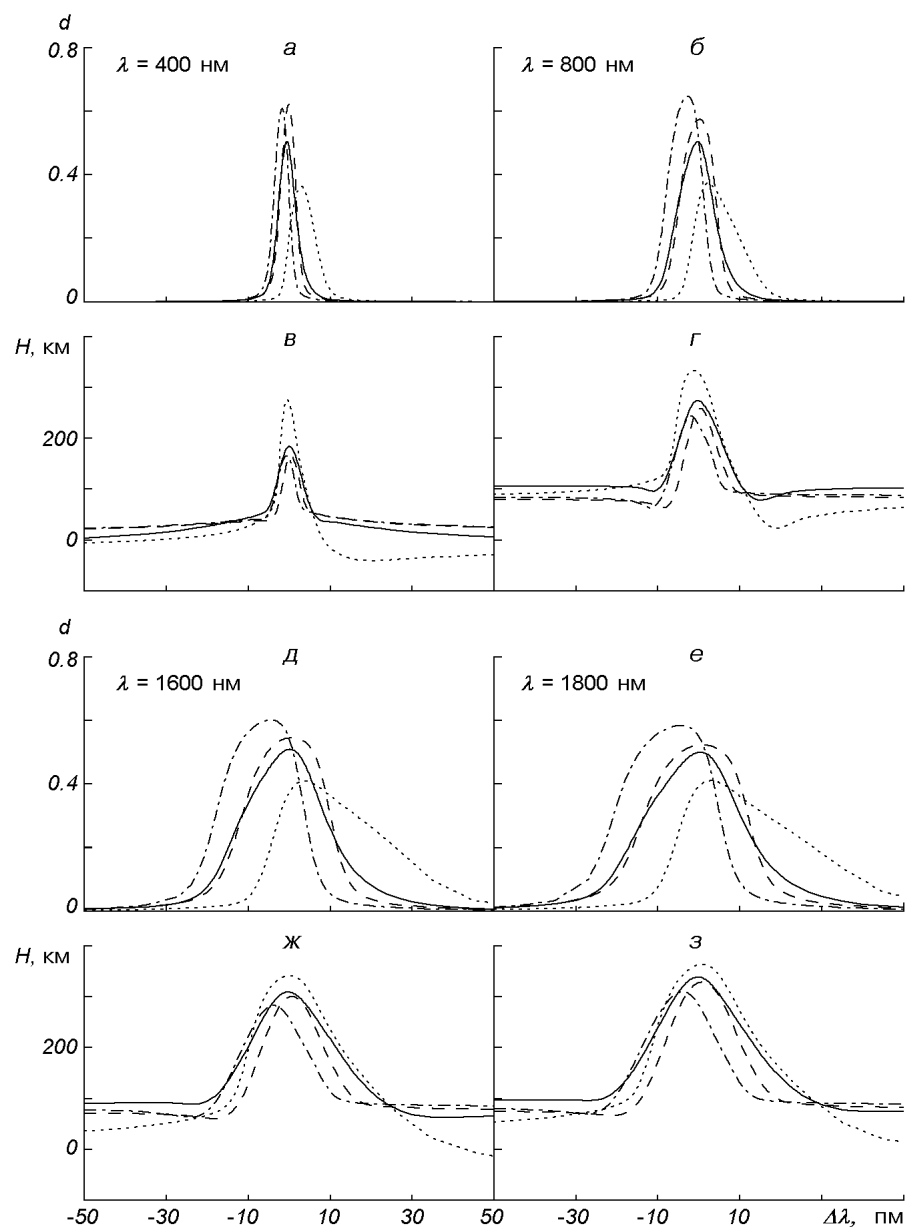


Рис. 4. То же, что на рис. 3, для линий в разных участках спектра, но с одинаковыми значениями центральной глубины $d = 0.5$ и $EP = 4.25$ эВ

ных линий можно сделать вывод, что красное крыло пространственно неразрешенной линии можно рассматривать как показатель степени участия межгранульных промежутков в процессах образования линии поглощения. Чем оно более протяженное и более асимметричное по сравнению с голубым, тем больший вклад в депрессию вносят межгранульные промежутки и тем более мощные потоки нисходящих движений есть в них. В то же время голубые крылья и сдвиги, в особенности слабых и умеренных линий, полностью зависят от физических условий центральных частей гранул.

АНАЛИЗ ИК-ЛИНИЙ

Не так давно появились достаточно обширные списки неблендированных ИК-линий трех полос солнечного спектра *J* (1.00—1.34 мкм), *H* (1.5—1.8 мкм) и *K* (1.9—2.5 мкм) [29, 31]. Из них наиболее часто в спектральных исследованиях атмосфер используются линии *H*-полосы, имеющие свои преимущества. Вследствие минимальной непрозрачности в континууме *H*-полосы в этих линиях можно видеть более глубокие слои фотосферы, чем в линиях полос *J* и *K* и линиях видимого диапазона. Например, линии Fe I с очень высокими потенциалами возбуждения и большими факторами Ланде очень чувствительны к магнитным полям, расположенным у основания фотосферы. Кроме этого, известно, что для ИК-линий наблюдается меньший контраст интенсивности в континууме. Это позволяет предположить, что они формируются в грануляционной ячейке иначе, чем линии видимого диапазона. Ряд отличий профилей ИК-линий от линий видимого диапазона с теми же основными параметрами объясняются сильной зависимостью коэффициента поглощения от длины волны. Известно, что селективное поглощение увеличивается пропорционально длине волны, а непрерывное поглощение в значительной степени зависит от вида поглотителей. Напомним, что в ИК-диапазоне непрозрачность в континууме достигает максимума около $\lambda = 1000$ нм, затем с увеличением длины волны уменьшается до минимума (около $\lambda = 1600$ нм) такого же порядка, как минимум около $\lambda = 400$ нм, а затем снова увеличивается. Но в общем (из-за увеличения коэффициента селективного поглощения) общая непрозрачность всегда значительно больше в ИК-линиях, чем в линиях видимого диапазона. Вследствие этого области формирования любых ИК-линий смещены в более высокие слои и значительно расширены в межгранульных промежутках. Причем эти эффекты усиливаются с увеличением силы линии и потенциала возбуждения. Отметим, что для ИК-линий Fe I потенциалы возбуждения изменяются в пределах от 2 до 6.4 эВ. Например, для линии с $d = 0.5$, $\lambda = 1800$ нм и $EP = 4.25$ эВ область формирования ядра полностью размещается в слоях проникающей конвекции. В межгранулах область образования сдвигается выше (рис. 2, з), чем для аналогичных по силе видимых линий (рис. 2, д). Вклад поглощения в ядре линии видимого диапазона межгранульными областями составляет около 25 % от максимального вклада, а для ИК-линий — не менее 50 %.

Дополнительный вклад межгранул в поглощение ИК-линий отражается на форме усредненных профилей. На рис. 4 показаны профили линий с центральной глубиной 0.5, $EP = 4.25$ эВ и длинами волн $\lambda = 400, 800, 1600$ и 1800 нм, а также профили высот их формирования. Все профили ИК-линий очень широкие, почти в два раза шире, чем аналогичные линии видимого диапазона. Наиболее широкий и асимметричный профиль образуется в межгранулах, где градиенты температур и скоростей большие, вследствие этого в усредненном профиле усилена асимметрия в красных крыльях по сравнению с линиями видимого диапазона. Профили эффективных высот также показывают, что области формирования ИК-линий более протяженные по высоте, чем для линий видимого диапазона. Среди них наиболее протяженными в геометрической шкале являются более слабые линии. Они эффективно образуются на высотах от -100 км до 300 км, в то время как область образования сильных ИК-линий простирается от 100 км до 330 км.

На рис. 5 мы представляем зависимости эффективных высот формирования линий Fe I, чтобы показать как эффективные высоты линий ИК- и

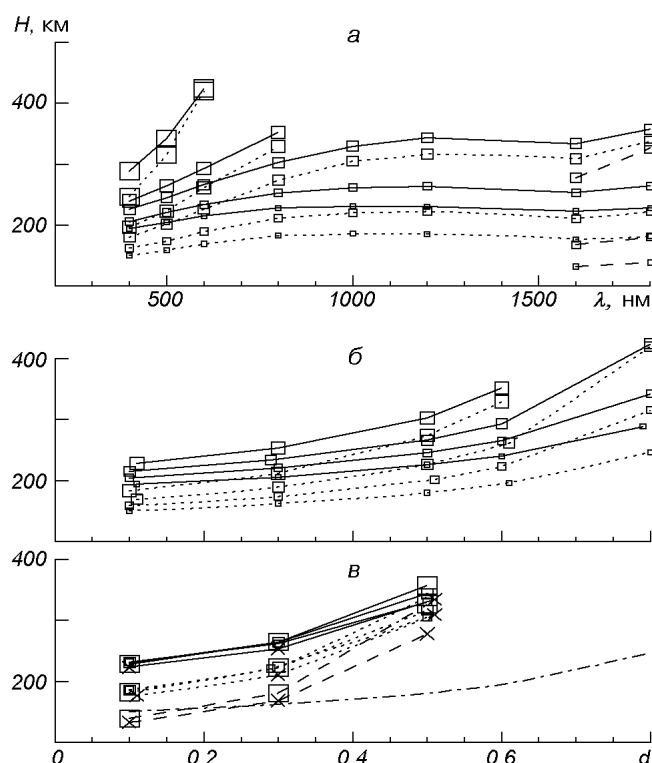


Рис. 5. Эффективные высоты формирования синтезированных линий Fe I в зависимости от длины волны (а) и центральной глубины линии для видимых (б) и ИК-линий (в). Сплошные линии — $EP = 2.5$ эВ, пунктирные — $EP = 4.25$ эВ, штриховые — $EP = 6.4$ эВ. Размер квадратиков увеличивается с увеличением: а) силы линии $d = 0.1, 0.3, 0.5, 0.6, 0.8$, б) длины волны $\lambda = 300, 400, 500, 600, 800$ нм, в) длины волны $\lambda = 1000, 1200, 1800$ нм. Линии с $\lambda = 1600$ нм специально выделены крестиком. Штрих-пунктирная линия — для наиболее глубоко образующейся линии $\lambda = 400$ нм и $EP = 4.25$ эВ

видимого диапазонов соотносятся между собой. Как видно, слабые линии ($d < 0.1$) в области $\lambda = 1600...1800$ нм с самым высоким для линий железа потенциалом возбуждения 6.4 эВ и $\lambda = 1600$ нм формируются наиболее глубоко, но с увеличением силы линии и понижением EP это свойство ИК-линий теряется. Следует отметить, что голубые сдвиги слабых ИК-линий с высокими потенциалами возбуждения, формирующиеся в наиболее глубоких слоях фотосферы, не являются самыми большими. Как видно с рис. 1, а, голубые сдвиги у ИК-линий меньше, чем сдвиги линий видимого диапазона. Также можно отметить, что сдвиги синтезированных линий любых длин волн с увеличением EP изменяются неоднозначно. Они могут как увеличиваться, так и уменьшаться независимо от средней высоты формирования линии, тогда как средние высоты формирования линий зависят от длины волны и EP более однозначно.

Итак, условия формирования синтезированных ИК-линий в отличие от аналогичных линий видимого диапазона в большей степени определяются процессами проникающей конвекции, которые приводят к перестройке областей формирования линии в грануле и межгранульных промежутках. В формировании ядра ИК-линий активно участвуют межгранульные области. Этим объясняется наблюдаемое уменьшение голубых сдвигов и понижение

контраста яркости в ИК-диапазоне. Результаты наших вычислений также показали, что только слабые ИК-линии Fe I в диапазоне $\lambda\lambda = 1500...1800$ нм с очень высокими потенциалами возбуждения (около 6.4 эВ) формируются в наиболее глубоких слоях фотосферы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате синтеза линий Fe I в рамках двумерных ГД-моделей были определены конвективные сдвиги линий и их зависимости от основных параметров линии. Полученные зависимости достаточно хорошо совпадают с наблюдаемыми данными. С помощью рассчитанных депрессионных функций вклада нам удалось объяснить, что величина сдвигов обусловлена условиями формирования линий в конвективной ячейке и этим подтвердить конвективную природу сдвигов. Выполненный анализ профилей линий, вычисленных в каждой колонке 2-мерной ГД-модели, совместно с их функциями вклада показал, что вклады в депрессию пространственно неразрешенных спектральных линий от гранул и межгранульных областей существенно различаются для слабых и сильных линий, а также для линий видимого и ИК-диапазонов. Слабые и умеренные линии видимого диапазона возникают в глубоких слоях фотосферы, где классическая структура конвекции не нарушена, т. е. горячие области поднимаются вверх, а холодные опускаются вниз. Сильные линии образуются в верхней фотосфере, в области проникающей конвекции, в которой происходит инверсия температуры. Температура в поднимающихся центральных областях конвективной ячейки становится более холодной, чем в опускающихся областях. Из-за температурной инверсии повышается роль межгранульных промежутков в образовании депрессии усредненной линии. В результате происходит увеличение вкладов из областей с нисходящими движениями, и сдвиги линий уменьшаются до нуля или становятся красными. Конвективные движения сильно влияют на форму профиля. Голубые крылья и ядра линий в основном формируются в центральных частях гранул, где преобладают восходящие движения. Далекие красные крылья формируются в межгранульных промежутках с нисходящими движениями. В сильных линиях в отличие от слабых и умеренных линий более сильное воздействие межгранульных областей приводит к усилению красных крыльев, а следовательно, к увеличению асимметрии. Красное крыло спектральной линии можно рассматривать как индикатор увеличения вклада поглощения из межгранульных промежутков. Для ИК-линий воздействие межгранульных областей на ядра и правые крылья становится более ощутимым не только в сильных линиях, но также и в слабых и умеренных линиях. Объясняется это увеличением непрозрачности с длиной волны, вследствие чего области формирования располагаются в фотосфере выше, чем для линий видимого диапазона. Тем не менее, следует помнить, что среди ИК-линий имеются слабые линии Fe I около $\lambda = 1600$ нм с очень высокими потенциалами возбуждения (≈ 6.4 эВ), которые формируются в наиболее глубоких слоях фотосферы. Эти линии могут быть очень ценными для диагностики физических условий глубоких слоев звездных атмосфер.

1. Брандт П. Н., Гадун А. С., Шеминова В. А. Абсолютные смещения солнечных спектральных линий Fe I и Fe II в активных областях (центр солнечного диска) // Кинематика и физика небес. тел.—1997.—13, № 5.—С. 75—86.
2. Гадун А. С. Многомерные гидродинамические модели атмосферы Солнца: эффекты

- переноса излучения в многомерной возмущенной среде // Кинематика и физика небес. тел.—1995.—**11**, № 3.—С. 54—72.
3. *Гадун А. С.* Содержание железа по двумерным неоднородным моделям солнечной атмосферы. Линии Fe I и Fe II (центр диска) // Кинематика и физика небес. тел.—1996.—**12**, № 4.—С. 19—31.
 4. *Гадун А. С.* Пространственные вариации резонансной линии лития λ 671 нм в двумерной искусственной грануляции // Кинематика и физика небес. тел.—1999.—**15**, № 2.—С. 153—159.
 5. *Гадун А. С., Воробьев Ю. Ю.* Характеристики искусственных гранул в двумерном численном гидродинамическом моделировании солнечной грануляции // Астрон. журн.—1996.—**73**, № 4.—С. 623—632.
 6. *Гадун А. С., Ханслмейер А.* Вариации асимметрии и параметров линий в гранульно-межгранульных областях двумерной искусственной грануляции // Кинематика и физика небес. тел.—1997.—**13**, № 3.—С. 24—48.
 7. *Гадун А. С., Ханслмейер А.* Корреляционный анализ двумерной солнечной атмосферы // Кинематика и физика небес. тел.—2000.—**16**, № 2.—С. 121—129.
 8. *Гадун А. С., Ханслмейер А.* Линии Fe II в задаче детектирования ударных волн в солнечной фотосфере // Кинематика и физика небес. тел.—2000.—**16**, № 2.—С. 130—137.
 9. *Allende Prieto C., Garcia Lopez R. J.* Fe I line shifts in the optical spectrum of the Sun // Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.—1998.—**129**, N 1.—P. 41—44.
 10. *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.
 11. *Cavallini F., Ceppatelli G., Righini A.* Profile variations of some photospheric lines as observed in active regions across the solar disk // Astron. and Astrophys.—1988.—**205**, N 1/2.—P. 278—288.
 12. *Dravins D., Larsson B., Nordlund Æ.* Solar Fe II line asymmetries and wavelength shifts // Astron. and Astrophys.—1986.—**158**, N 1/2.—P. 83—88.
 13. *Dravins D., Lindegren L., Nordlund Æ.* Solar granulation: influence of convection on spectral line asymmetries and wavelength shifts // Astron. and Astrophys.—1981.—**96**, N 1/2.—P. 345—364.
 14. *Freytag B., Ludwig H.G., Steffen M.* Hydrodynamical models of stellar convection. The role of overshoot in DA white dwarfs, A type stars, and the Sun // Astron. and Astrophys.—1996.—**313**, N 2.—P. 497—517.
 15. *Gadun A. S., Hanslmeier A., Pikalov K. N.* Bisectors and line-parameter variations over granular and intergranular regions in 2-D artificial granulation // Astron. and Astrophys.—1999.—**320**, N 3.—P. 1001—1012.
 16. *Gadun A. S., Pavlenko Ya. V.* 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.
 17. *Gadun A. S., Solanki S. K., Johannesson A.* Granulation near the solar limb: observations and 2-D modeling // Motions in the Solar Atmosphere. — Dordrecht: Kluwer, 1999.—P. 201—204.
 18. *Gadun A. S., Solanki S. K., Ploner S. R. O., et al.* Scale-Dependent Properties of 2-D Artificial Solar Granulation. — Kiev: MAO, 1998.—80 p.—(Preprint / National Academy of Science of Ukraine. Main Astronomical Observatory; MAO-98-4E).
 19. *Grossman-Doerth U.* Height formation of solar photospheric spectral lines // Astron. and Astrophys.—1994.—**285**, N 3.—P. 1012—1018.
 20. *Gurtovenko E. A., Sheminova V. A., Sarychev A. P.* What is the difference between «emission» and «depression» contribution functions? // Solar Phys.—1991.—**136**, N 2.—P. 239—250.
 21. *Kiselman D.* High-spectral resolution solar observations of spectral lines used for abundance analysis // Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.—1994.—**104**, N 1.—P. 23—77.
 22. *Kiselman D., Nordlund Æ.* 3D non-LTE line formation in the solar photosphere and the solar oxygen line abundance // Astron. and Astrophys.—1995.—**302**, N 2.—P. 578—586.
 23. *Kucera A., Balthasar H., Rybak J., Wohl H.* Heights of formation of Fe I photospheric lines // Astron. and Astrophys.—1998.—**332**, N 3.—P. 1069-1074.
 24. *Kurucz R. L.* Opacities for Stellar Atmospheres. — CD ROM 2, 1993.
 25. *Magain P.* Contribution function and the depths of formation of spectral lines // Astron. and Astrophys.—1986.—**163**, N 1/2.—P. 135—139.
 26. *Nadeau D., Mailard J. P.* Observational evidence of line shifts induced by the convective overshoot in the atmosphere of red giants // Astrophys. J.—1988.—**327**, N 1.—P. 321—327.
 27. *Nordlund Æ., Dravins D.* Solar granulation. III. Hydrodynamic model atmospheres // Astron. and Astrophys.—1990.—**228**, N 1.—P. 155—183.
 28. *Pushman K., Hanslmeier A., Solanki S.* Solar and Stellar Granulation: IAU Symp. 178 / Ed. by K. G. Strassmeier. — Vienna, 1995.—P. 117.

29. *Ramsauer J., Solanki S. K., Biemont E.* Interesting lines in infrared solar spectrum. II. Unblended lines between λ 1.0 and λ 1.8 μm // *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.*—1995.—**113**, N 1.—P. 71—89.
30. *Rast M. P., Nordlund \ddot{E} ., Stein R. F., Toomre J.* Ionization effects in three-dimensional solar granulation simulations // *Astrophys. J.*—1993.—**408**, N 1.—P. L53—L56.
31. *Ruedi I., Solanki S. K., Livingston W., Harvey J.* Interesting lines in infrared solar spectrum. III. A polarimetric survey between 1.5 and 2.50 μm // *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.*—1995.—**113**, N 1.—P. 91—106.
32. *Samain D.* Is the ultraviolet spectrum of the quiet Sun redshifted? // *Astron. and Astrophys.*—1991.—**244**, N 1.—P. 217—227.
33. *Stein R. F., Nordlund \ddot{E} .* Simulations of solar granulation. I. General properties // *Astrophys. J.*—1998.—**499**, N 2.—P. 914—933.

Поступила в редакцию 13.11.01