О ДОСТОВЕРНОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЗВЕЗДНЫХ АТМОСФЕР С ПОМОЩЬЮ СИНТЕЗА КРЫЛЬЕВ ЛИНИЙ *H* И *K* CA II

В. А. Шеминова

Главная астрономическая обсерватория НАН Украины
03680 Киев ГСП, ул. Академика Заболотного, 27
e-mail: shem@mao.kiev.ua

На основании данных численного многомерного магнитогидродинамического моделирования солнечной конвекции исследуется надежность одномерного моделирования областей фотосферы, выполненного с использованием синтеза крыльев линий H и K Ca II. Эти линии являются идеальным инструментом для исследований солнечной и звездных атмосфер, благодаря легкодоступной для наземных наблюдений области спектра, отчетливому их проявлению в спектрах многих звезд и образованию их внешних крыльев в условиях локально-термодинамического равновесия. Анализ полученных результатов показывает, что относительно простое одномерное моделирование является достоверным для разных областей фотосферы Солнца. Наиболее надежно моделируются глубокие слои спокойной фотосферы в диапазоне оптических глубин от $\lg \tau_5 = 1$ до -3.5. Мы рекомендуем использовать одномерное моделирование атмосферы на основании синтеза внешних крыльев линий H и K Ca II для исследования звездных атмосфер и разных областей на поверхности Солнца.

ВВЕДЕНИЕ

Линии резонансного дублета Ca II с длиной волны 393.3 нм (линия K) и 396.8 нм (линия H) являются наиболее глубокими и широкими фраунгоферовыми линиями в видимом спектре Солнца. Это единственный дублет в видимой области спектра, который образуется обильным химическим элементом, находящимся в фотосфере Солнца преимущественно в ионизированном состоянии. Центральная часть этих линий имеет необычную форму – двойной реверс интенсивности. Он очень чувствителен к изменениям температуры, плотности и нетепловой (микротурбулентной) скорости в атмосфере. Поэтому ядра и внутренние крылья (внутри ± 0.1 нм от центра линии) уже давно начали привлекать внимание многих исследователей для изучения температуры, магнитной активности и других физических свойств нижней хромосферы Солнца и звезд (см., например, [3, 7, 13, 15, 23, 24, 27, 29]). Также много работ посвящено замечательному эффекту Wilson–Bappu – корреляция ширины эмиссионных ядер H и K Ca II и светимости звезд [3, 23]. Кроме ядер, довольно успешно использовались внешние (вне ± 0.1 нм от центра линии) крылья этих линий в работах [4–8] для построения полуэмпирических моделей атмосфер Солнца и таких звезд, как Процион и Арктур. Следует отметить, что по сравнению с синтезом линий железа, который часто используется в моделировании атмосфер, синтез внешних крыльев линий H и K имеет целый ряд преимуществ:

- В наблюдаемых спектрах Солнца и звезд фиолетовый участок вблизи длины волны 400 нм является одним из лучших окон в глубокие слои фотосферы. Он даже лучше, чем хорошо известный инфракрасный участок вблизи $\lambda 1642$ нм, вследствие большей чувствительности к температурным флуктуациям [6].
- Информация о температурной стратификации содержится в относительно узкой части спектра (8 нм), т. е. в пределах охвата крыльев линий [26]. Нет необходимости наблюдать и калибровать весь спектр, как это требуют методы моделирования, использующие непрерывный спектр звезды во всех его участках или центр-край наблюдения.
- Функция источника совпадает с функцией Планка в области фотосферы вплоть до температурного минимума [23]. Это обусловлено тем, что в фотосфере Солнца почти весь кальций (больше 90%) находится в состоянии однократной ионизации и ультрафиолетовое поле излучения, которое играет важную роль в ионизационном равновесии, не влияет на состояние ионов кальция.
- В образовании внешних крыльев основную роль играют процессы затухания вследствие столкновения с нейтральными атомами водорода, и для расчета непрозрачности можно использовать приближение ЛТР. Образование внутренних крыльев контролируется процессами излучения и

переизлучения, поэтому для них требуется учитывать процессы некогерентного рассеяния, т. е. необходимы сложные неЛТР-расчеты [33, 34].

- Расчет постоянной затухания ван дер Ваальса как основного параметра, контролирующего форму внешних крыльев затухания, выполняется достаточно точно и просто по формулам [10], полученным на основании квантовомеханической теории.
- Форма внешних крыльев практически не зависит от влияния нетепловых движений, поэтому высокая точность таких параметров, как микро и макротурбулентные скорости, не требуется для их синтеза. На внешние крылья также мало влияет магнитное поле фотосферы [12].

К сожалению, в синтезе H и K линий имеется одна сложная проблема. Это – известный эффект «line haze» или «missing opacity» в фиолетовом участке спектра около длины волны 400 нм. В предыдущей нашей работе [31] этот эффект был детально изучен, а сам метод синтеза H и K крыльев, предложенный ранее [4, 5, 32], модифицирован. Применив этот метод к моделированию как спокойной фотосферы, так и ярких магнитных точек в фотосфере, мы в [31] показали, что он является чрезвычайно простым и удобным инструментом для моделирования любых образований фотосферы при наличии спектров с высоким пространственным разрешением.

В последние десятилетия успешно развивается многомерное численное гидродинамическое (ГД) и магнитогидродинамическое (МГД) моделирование солнечной и звездных атмосфер (см. обзор [9]). Такое моделирование основано на решении системы уравнений радиационной магнитогидродинамики. Полученные МГД-модели областей фотосферы являются самосогласованными и реалистичными. Это чрезвычайно трудоемкий путь построения моделей атмосферы, но необходимый в настоящее время. Уже известно несколько таких ГД- и МГД-моделей областей фотосферы, поэтому у нас возникла идея использовать результаты численного моделирования солнечной конвекции для проверки надежности одномерного (1D) моделирования атмосферы Солнца с использованием синтеза внешних крыльев линий H и K. Эта идея была положена в основу данной работы.

ХАРАКТЕРИСТИКИ ГД- И МГД-МОДЕЛЕЙ

Мы выбрали три последовательности моделей, полученные в результате численного моделирования. Первая последовательность 3D-ГД-моделей [36] воспроизводит изменения межсеточной области в спокойной фотосфере Солнца в течение одного часа реального солнечного времени. Размеры этой области на поверхности 5600×5600 км ($7.7\times7.7''$). Полный вертикальный размер области моделирования – 3110 км, а высота атмосферы – 1710 км. Пространственный шаг моделирования 40 км в горизонтальном направлении. В вертикальном направлении, начиная от основания области моделирования, шаг равен 46 км, а выше – 12 км. Расчетная сетка состоит из 140×140×200 точек. Открытые нижние граничные условия позволяют материи свободно вытекать из моделируемого бокса и втекать. Прозрачные верхние граничные условия дают возможность волнам свободно выходить из бокса. Периодические боковые граничные условия виртуально многократно расширяют область моделирования в обе стороны в зеркальном отображении. Мы использовали для синтеза 1-час последовательность ГД-моделей из 55 моделируемых боксов (кубов), в каждом из которых содержится 19 600 колонок вдоль луча зрения или 1D-моделей.

Вторая последовательность 3D-МГД-моделей [14] воспроизводит область магнитогрануляции, которая по своим проявлениям в G-полосе очень похожа на межсеточную область спокойного Солнца с яркими точками, расположенными в межгранульных промежутках. Напряженность вертикального магнитного поля в ярких точках достигает 1700 Гс. Внутри гранул преобладают слабые горизонтальные магнитные поля. Область моделирования на поверхности имеет размер 6000×6000 км и простирается вниз и вверх от нулевого уровня на 2500 км. Она включает одну мезогранулу и несколько гранул. Горизонтальное разрешение 25 км, а вертикальное – 15 км в верхних слоях и 35 км в нижних. Начальное магнитное поле задавалось как однородное вертикальное с напряженностью 250 Гс. Граничные боковые условия были периодические, а верхние и нижние – открытые. Для синтеза линий мы использовали один бокс в конкретный момент моделирования, который имеет 57 600 1D-моделей.

Третья последовательность 2D-МГД-моделей [2] представляет область магнитогрануляции в фотосферной магнитной сетке. Напряженность в магнитных трубках сетки достигает 1500–2000 Гс на поверхности. Горизонтальный размер области моделирования – около 4000 км, а вертикальный – 735 км выше нулевого уровня и 1370 км ниже. Пространственный шаг равен 35 км. Боковые условия – периодические, а верхние и нижние – открытые. Начальное магнитное поле – неоднородное с двухпетельной конфигурацией и разными полярностями. Его средняя абсолютная напряженность $<|B|> = 54$ Гс. С течением времени моделирования напряженность поля возрастала. В избранной для синтеза 0.5-час последовательности, содержащей 6 720 1D-моделей, $<|B|> = 400$ Гс на уровне поверхности.

Итак, в нашем анализе используются три последовательности моделей, которые воспроизводят три различные области на поверхности Солнца: спокойную межсеточную область без магнитного поля; межсеточную область с $<|B|> = 250$ Гс, в которой светятся яркие магнитные точки; область сильной магнитной сетки с $<|B|> = 400$ Гс.

СИНТЕЗ КРЫЛЬЕВ ЛИНИЙ *H* И *K* CA II

Синтез крыльев линий H и K выполняется с помощью кода SPANSAT [1], в котором использовано приближение ЛТР, одномерный перенос излучения в однородной плоско-параллельной атмосфере. Расчет коэффициента непрерывного поглощения включает поглощение H I, H_2^+, H^-, He I, He II, He^-, C I, Mg I, Si I, Al I, Fe I, N I, O I, Si II, Mg II, Ca II, релеевское рассеяние на H I, H_2 и He I, томпсоновское рассеяние на свободных электронах. В синтез линий H и K также включены линии поглощения H I и 2914 бленд согласно списка из базы данных VALD [22] (URL `http://www.astro.univie.ac.at/~vald`). Эффект "missing opacity", обусловленный поглощениям неизвестными источниками в фиолетовом участке спектра вблизи длины волны 400 нм, для данной задачи можно не учитывать, потому что мы не используем в нашем анализе наблюдаемый спектр. Мы также не учитывали процессы когерентного рассеяния в крыльях H и K. Их роль в переносе излучения в линиях H и K неоднократно изучалась и было показано, что во внешних крыльях этих линий когерентное рассеяние становится несущественным (см., например, [4, 33, 34]).

Атомные параметры линий H и K были те же, что в нашей предыдущей статье [31]. Содержание кальция $A_{Fe} = 6.38$, $\lg gf(\lambda 393.3) = 0.134$, $\lg gf(\lambda 396.8) = -0.18$. Постоянная затухания вследствие столкновений с нейтральными атомами водорода вычислялась согласно формулам [10], которые дают реалистические значения и снимают проблему постоянной затухания в расчетах протяженных крыльев H и K. Микро- и макротурбулентные скорости для синтеза в рамках ГД- и МГД-моделей не требуются. Значения поля скоростей известны в каждой точке моделируемого бокса наряду с другими параметрами модели атмосферы как результат ГД- и МГД-моделирования. Для синтеза в рамках 1D-моделирования мы приняли общую турбулентную скорость, равную 1.5 км/сек. Синтез крыльев H и K выполнялся с неравномерным шагом по длине волны в специально подобранных участках каждого крыла, где явно отсутствовали бленды. Таких чистых точек по профилю синтезируемых крыльев было выбрано 28.

Для расчета усредненного профиля крыльев H и K в рамках многомерных ГД- и МГД-моделей мы применили так называемый метод 1.5-D решения уравнений переноса. Сначала вычислялись профили для каждой колонки вдоль луча зрения (или каждой 1D-модели) в моделируемом боксе, затем они усреднялись в каждом боксе и по всем боксам. Таким образом полученный усредненный по пространству и времени профиль крыльев H и K далее использовался вместо наблюдаемого профиля в процедуре 1D-моделирования средней по пространству и времени атмосферы Солнца.

1D-МОДЕЛИРОВАНИЕ АТМОСФЕРЫ

Обычное классическое 1D-моделирование средней по пространству и времени атмосферы основано на синтезе непрерывного спектра и/или фраунгоферовых линий и подгонке их к наблюдаемым спектрам, полученным со средним пространственным и временным разрешением. Под средним разрешением в наблюдениях Солнца подразумевают несколько секунд дуги и время нескольких периодов осцилляций p-мод. Важным в таком моделировании является принятие упрощающих расчеты приближений, таких как предположение о плоско-параллельной геометрии и однородности среды в горизонтальном направлении. Считается, что одномерное моделирование атмосферы является удовлетворительным, если горизонтальный размер моделируемой атмосферы намного больше вертикального размера. При среднем пространственном разрешении это условие выполняется для спокойного Солнца. Еще принимается предположение о гидростатическом равновесии в моделируемых слоях атмосферы, равно как и предположение об ионизационном, химическом и локально-термодинамическом равновесиях.

Процесс моделирования начинается с принятия произвольной начальной модели, т. е. температурной стратификации, газового давления и химического состава атмосферы. Заметим, что фотосферные слои довольно чувствительны к содержанию элементов с низкими значениями первого потенциала ионизации. Именно эти элементы являются вкладчиками электронов и влияют на электронное давление в фотосфере. Поэтому важно в расчетах использовать наиболее точные значения содержания химических элементов. В данном случае приняты новые уточненные значения содержаний из таблицы, представленной в работе [17]. На основании заданной начальной модели вычисляется электронное давление, концентрация всех частиц, коэффициент непрерывного поглощения. После этого выполняется синтез выбранных для моделирования спектральных линий в рамках заданной начальной модели атмосферы. Вычисленный профиль линии сравнивается с наблюденным профилем. Если совпадение неудовлетворительное, последовательными итерациями, изменяя начальную температурную стратификацию модели, добиваются наилучшего согласия между синтезированным и наблюдаемым профилем спектра. После каждого шага итераций модель пересчитывается с новой температурной зависимостью и с учетом изменения среднего молекулярного веса атмосферы. Полученная в результате подгонки участка спектра 1D-модель атмосферы, в принципе, должна удовлетворительно описывать весь наблюдаемый со средним разрешением спектр Солнца.

К настоящему времени таким способом построено много 1D-моделей атмосферы спокойного Солнца, которые часто называют полуэмпирическими. Наиболее известные из них: BCA [19] и HSRA [20], HOLMU [21], VALC [35], MACKKL [25], FALC [16]. Совсем недавно в работе [18] была снова уточнена модель спокойного Солнца, FAL07. В последнее время пространственное разрешение позволяет наблюдать отдельно гранулы и межгранульные промежутки, поэтому уже появляются двумерные или двухкомпонентные модели, например модель BBR [11]. Полный обзор работ по моделям солнечной атмосферы можно найти в [28]. До сих пор построение полуэмпирических моделей атмосферы остается трудной задачей прежде всего потому, что требуется синтез большого количества спектральных линий. Для этого необходимы точные знания многих атомных и других параметров. Современные инверсионные коды (например [30]) как раз и работают по такой схеме, используя синтез большого количества линий, для уточнения температурной зависимости в широком диапазоне глубин. Недавно мы в [31] снова обратились к синтезу внешних крыльев H и K линий Ca II для 1D-моделирования разных областей фотосферы Солнца и продемонстрировали эффективность такого подхода на современном этапе исследований. Когда для моделирования используется синтез только двух спектральных линий, исключаются неопределенности многих входных параметров и значительно упрощается сама процедура 1D-моделирования атмосферы, т. е. не приходится делать ряд дополнительных итераций для уточнения плохо известных параметров.

КАЛИБРОВКА 1D-МОДЕЛИРОВАНИЯ АТМОСФЕРЫ

Мы называем калибровкой 1D-моделирования процедуру проверки достоверности 1D-моделирования с помощью результатов численного ГД- или МГД-моделирования. Ее суть заключается в следующем. Реальные области атмосферы, в которых происходит образование наблюдаемого спектра, заменяем аналогами, созданными с помощью численного многомерного ГД- или МГД-моделирования поверхностных слоев Солнца в виде цифровых последовательностей ГД- или МГД-моделей. В рамках этих самосогласованных моделей вычисляются профили спектральных линий и затем определяется усредненный профиль каждой спектральной линии по всему моделируемому пространству и времени, который заменяет наблюдаемый профиль этих линий. К усредненному профилю точно так же, как к наблюдаемому со средним разрешением, подгоняется профиль линии, вычисляемый в процессе 1D-моделирования атмосферы. 1D-модель атмосферы (как результат 1D-моделирования) сопоставляется с результатами МГД-моделирования, т. е. со средней по всей последовательности МГД-моделью, которая служит эталоном. Таким способом можно относительно легко прокалибровать полуэмпирическое 1D-моделирование атмосферы. Мы выполнили такую калибровку 1D-моделирования, основанного на синтезе крыльев H и K, используя аналоги трех разных областей солнечной атмосферы.

На рис. 1, *слева* показано лучшее совпадение профилей крыльев H и K в каждой синтезируемой точке, которое было достигнуто нами в результате 1D-моделирования трех различных областей солнечной фотосферы: спокойной без магнитного поля (a), спокойной с яркими магнитными точками (b) и сильной магнитной сетки (c), представленных 3D-ГД-, 3D-МГД- и 2D-МГД-моделями соответственно. На рис. 1, *справа* представлены соответственно полученные 1D-модели в сравнении со средними 3D-ГД-, 3D-МГД- и 2D-МГД-моделями. Как видно, мы получили для спокойной области удовлетворительное совпадение с точностью 50 K в большом диапазоне оптических глубин $\lg \tau_5$ от 1 до -3.5. Это означает, что в этой области глубин диагностика, основанная на синтезе крыльев H и K, работает вполне успешно. В более глубоких слоях (глубже $\lg \tau_5 = 1$) и в более высоких (выше $\lg \tau_5 = -3.5$) синтезированные крылья H и K мало чувствительны к изменению температурной стратификации, поэтому эта область практически не доступна для 1D-моделирования с использованием крыльев H и K. Для магнитных областей удовлетворительное совпадение ограничивается уровнем $\lg \tau_5 = -2.5$ (область фотосферы с яркими магнитными точками) и -2 (область магнитной сетки). По-видимому, это частично связано с величиной плотности магнитного потока в данной области фотосферы, т. е. чем она больше, тем влияние магнитного поля на атмосферные параметры сильнее. Поэтому для моделирования магнитных образований в областях фотосферы, необходимо учитывать магнитное поле так, как это мы делали в [31], моделируя яркие точки.

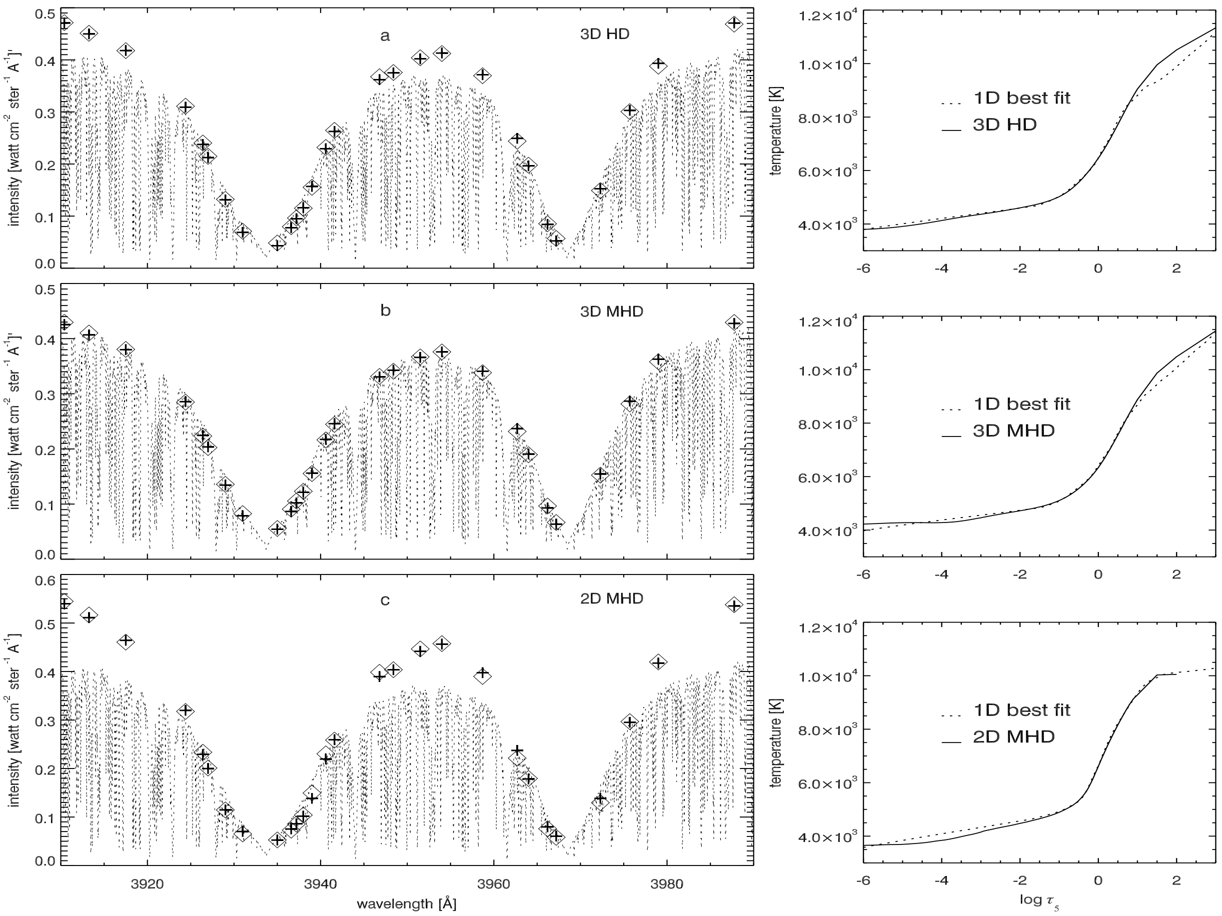

Рис. 1. *Слева* – лучшее совпадение профилей крыльев H и K, полученных в рамках 1D-моделей для аналогов трех областей фотосферы (крестики), с усредненными профилями в рамках 3D-ГД-, 3D-МГД- и 2D-МГД-моделей (ромбики). Для сравнения с наблюдениями пунктирной линией показан профиль согласно атласу Браульта–Неккеля [26]. *Справа* – температурные зависимости, полученные в результате 1D-моделирования (пунктир) тех же трех областей при лучшем совпадении синтезированных профилей крыльев H и K, а также температурная зависимость, выведенная по усредненным данным численного 3D-ГД-, 3D-МГД- и 2D-МГД-моделирования (сплошная линия)

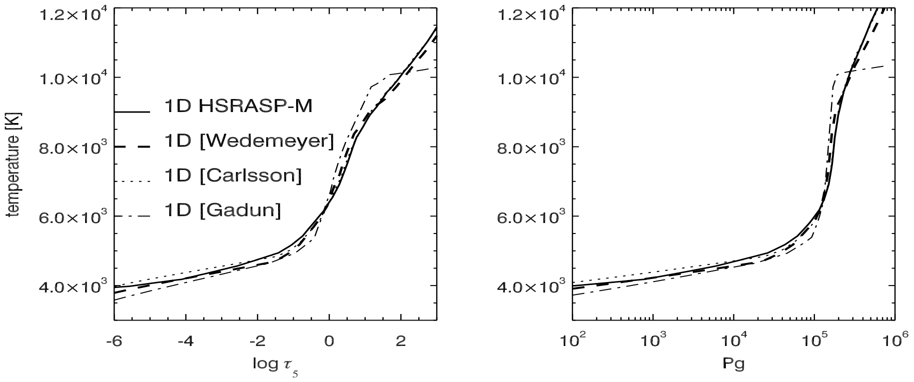

Рис. 2. Результаты 1D-моделирования с использованием крыльев H и K для аналогов трех областей солнечной атмосферы, полученных по данным численного моделирования 3D-ГД (штриховая линия), 3D-МГД (пунктирная линия) и 2D-МГД (штрих-пунктирная), а также 1D-модель HSRASP-M (сплошная линия), полученная для реальной спокойной атмосферы, по данным наблюдений из атласа Браульта–Неккеля [26]

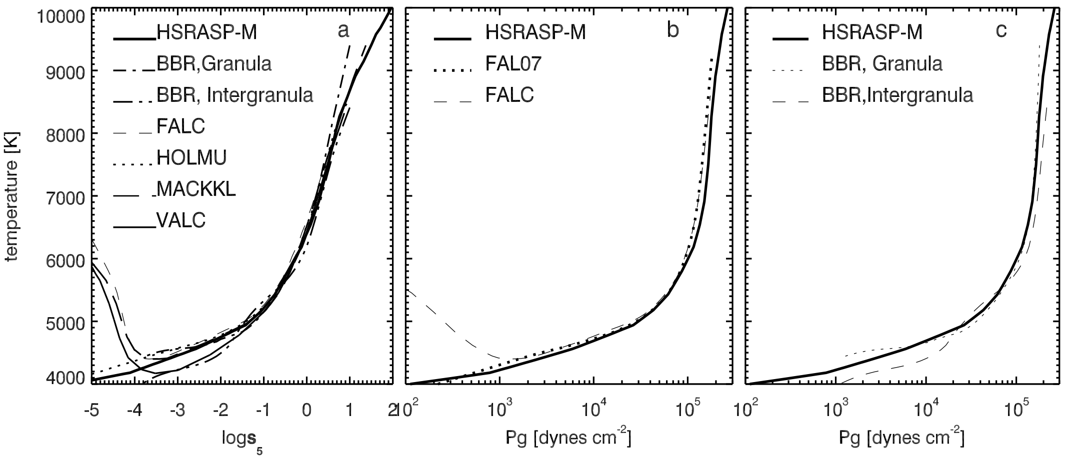

Рис. 3. Температурная стратификация фотосферы Солнца по результатам 1D-моделирования разных авторов

ДИСКУССИЯ И ВЫВОДЫ

1D-моделирование атмосферы с использованием синтеза крыльев H и K позволяет относительно простым способом изучать физические свойства звездных атмосфер, поэтому эту процедуру можно назвать HK-диагностика атмосфер. На наш взгляд, основной недостаток этой диагностики – открытая проблема, связанная с эффектом "missing opacity". Неучет этого эффекта ведет к завышению искомого температурного градиента в глубоких слоях фотосферы. Мы ранее уже исследовали этот эффект в работе [31] и предложили в расчетах непрерывного спектра использовать масштабный множитель в зависимости от высоты и длины волны. В работе [18] для понижения интенсивности непрерывного спектра в фиолетовой области включили дополнительные источники непрозрачности, такие как CH и OH. К сожалению, пока нет окончательного решения этой проблемы. Требуются новые нетривиальные вычисления фиолетового спектра с новыми более точными атомными данными или с новыми источниками непрозрачности. С решением этой проблемы надежность HK-диагностики атмосфер значительно повысится.

На рис. 2 представлены температурные зависимости, полученные нами в 1D-моделях при использовании синтеза крыльев H и K для трех аналогов солнечной фотосферы, а также 1D-модель HSRASP-M, полученная с использованием наблюдаемого H и K спектра в [31]. Как видно, все 1D-модели, выведенные из аналогов, имеют слегка завышенный температурный градиент в глубоких слоях фотосферы по сравнению с HSRASP-M. Причиной расхождения с наблюдениями может быть неучет эффектов "missing opacity". Абсолютная интенсивность крыльев H и K, вычисленная без учета этих эффектов, как правило, получается завышенной, особенно это заметно в далеких крыльях линий (рис. 1, *слева*). Тем не менее, усредненный профиль в рамках 3D-МГД-моделей [14] удовлетворительно совпал с наблюдениями. Это свидетельствует о существовании других причин, кроме "missing opacity". Например, несовершенство численного моделирования тоже может влиять на конечный результат, т. е. на используемые ГД- и МГД-модели областей атмосферы Солнца. Так, например, в 3D-ГД-моделировании не учитывается магнитное поле спокойной фотосферы. 3D-МГД-последовательность моделей относится только к конкретному моменту времени, т. е. в ней не учитываются 5-мин осцилляции при расчете интенсивности усредненного профиля крыльев линий H и K. В 2D-МГД-моделировании магнитной сетки приближение двухмерности, безусловно, повлияло на структуру грануляции и на поле скоростей. Кроме того, еще одной причиной наиболее резкого температурного градиента в 1D-модели, выведенной по данным 2D-МГД-моделирования, может быть неучет влияния магнитного поля на атмосферные параметры в процессе 1D-моделирования. Как раз в 2D-МГД-моделях имеется большое число сильных магнитных концентраций с килогауссовой напряженностью в области моделирования, и это может сказаться на температурном градиенте в 1D-модели.

Рис. 3, *a* показывает результаты полуэмпирического 1D-моделирования спокойной фотосферы Солнца, полученные в разные годы разными авторами. Можно отметить, что температурные зависимости в известных моделях, таких как HOLMU, MACKKL, VALC, FALC, а также в нашей модели HSRASP-M, тесно переплетаются между собой. Расхождения начинаются в верхней фотосфере с оптической глубины $\lg\tau_5 = -1.5$. Наибольшие различия имеются между более ранними моделями HOLMU [21] и VALC [35].

Последующие модели MACKKL [25] и FALC [16] в этой области приблизились к HOLMU. Наша модель фотосферы HSRASP-M [31] оказалась достаточно близкой к MACKKL. Новая модель FAL07 [18], выведенная для спокойной межсеточной области, в верхней фотосфере значительно лучше согласуется с нашей моделью HSRASP-M, чем все остальные (рис. $3, b$). Этот факт независимо подтверждает надежность *HK*-диагностики атмосфер. Чтобы исключить возможные сдвиги в шкале геометрических высот разных моделей, мы ввели на рис. $3, b$ и $3, c$ шкалу газового давления подобно [18].

Мы сравнили на рис. $3, c$ HSRASP-M с 2-компонентной моделью BBR. Видно, что модель HSRASP-M хорошо совпадает с моделью гранулы в нижней части фотосферы. В слоях, где происходит инверсия грануляции, HSRASP-M представляет среднюю температуру между температурами гранулы и межгранулы. На наш взгляд, такое поведение температурной зависимости в HSRASP-M по отношению к моделям BBR является вполне достоверным. В будущем представляется интересным построить 2-компонентную модель фотосферы Солнца, используя H и K диагностику, для прямого сравнения с моделями BBR, построенными на основании линий железа.

Итак, на основании выполненной калибровки 1D-моделирования можно сделать следующие выводы:

1. Предлагаемая относительно простая и удобная *HK*-диагностика атмосфер является надежной для исследования спокойных участков на поверхности Солнца в фотосферных слоях от $\lg \tau_5 = 1$ до -3.5. При использовании *HK*-диагностики требуется учитывать эффекты “missing opacity” в синтезе крыльев H и K. В случае моделирования областей фотосферы с наличием магнитных концентраций необходимо также учитывать влияние магнитного поля.
2. Результаты данного анализа подтверждают достоверность температурной стратификации в спокойной фотосфере Солнца, представленной нами в модели HSRASP-M [31].
3. Синтез крыльев H и K можно применять в инверсионных кодах для быстрого анализа солнечного спектра с высоким пространственным разрешением (около $0.1''$), а также для моделирования звездных атмосфер.

Автор выражает искреннюю благодарность Rob Rutten за детальное обсуждение идеи этой работы, а также Svan Wedemaeyer и Mats Carlsson за предоставление данных численного моделирования солнечной грануляции и магнитогрануляции.

[1] *Гадун А. С., Шеминова В. А.* SPANSAT: Программа расчета профилей спектральных линий поглощения в звездных атмосферах в ЛТР-приближении // Препр. АН УССР. Ин-т теор. физики, ИТФ-88-87Р, Киев. – 1988. – С. 1–37.

[2] *Гадун А. С., Шеминова В. А, Соланки С. К.* Формирование мелкомасштабных магнитных структур: поверхностный механизм // Кинематика и физика небес. тел. – 1999. – **15**, N 5. – С. 387–397.

[3] *Athay R. G., Skumanich A.* Emission cores in H- and K-lines. III. The Wilson-Bappu effect // Astrophys. J. – 1968. – **152**. – P. 141–150.

[4] *Ayres T. R.* Semiempirical upper photosphere models – The Sun (G2 V) and Procyon (F5 IV-V) // Astrophys. J. – 1975. – **201**. – P. 799–815.

[5] *Ayres T. R.* A reexamination of solar upper photosphere models, the calcium abundance, and empirical damping parameters // Astrophys. J. – 1977. – **213**. – P. 296–308.

[6] *Ayres T. R.* How deep can one see into the sun? // Solar Phys. – 1989. – **124**. – P. 15–12.

[7] *Ayres T. R., Linsky J. L.* Stellar model chromospheres. III. Arcturus (K2 III) // Astrophys. J. – 1975. – **200**. – P. 660–674.

[8] *Ayres T. R., Linsky J. L.* The Mg II H and K lines. II. Comparison with synthesized profiles and Ca II K // Astrophys. J. – 1975. – **205**. – P. 874–894.

[9] *Steiner O.* Recent progresses in the simulation of small-scale magnetic fields // Modern solar facilities – advanced solar science: Proc. Workshop / Eds F. Kneer, K. G. Puschmann, A. D. Wittmann. – Universitatsverlag, Göttingen, 2007. – P. 321–337.

[10] *Barklem P. S., O'Mara B. J.* The broadening of strong lines of Ca+, Mg+ and Ba+ by collisions with neutral hydrogen atoms // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc. – 1998. – **300**. – P. 863–871.

[11] *Borrero J. M., Bellot Rubio L. R.* A two-component model of the solar photosphere from the inversion of spectral lines // Astron. and Astrophys. – 2002. – **385**. – P. 1056–1072.

[12] *Bruls J. H. M. J., Trujillo Bueno J.* The polarization-free approximation applied to multi-level non-LTE radiative transfer // Solar Phys. – 1996. – **164**. – P. 155–168.

[13] *Carlsson M., Stein R. F.* Formation of solar calcium H and K bright grains // Astrophys. J. – 1997. – **481**. – P. 500–514.

[14] *Carlsson M., Stein R. F., Nordlund Å., Scharmer G. B.* Observational manifestations of solar magnetoconvection: center-to-limb variation // Astrophys. J. – 2004. – **610**. – P. L137–L140.

[15] *Cram L. E., Dame L.* High spatial and temporal resolution observations of the solar Ca II H line // Astrophys. J. – 1983. – **272**. – P. 355–361.

[16] *Fontenla J. M., Avrett E. H., Loeser R.* Energy balance in the solar transition region. III. Helium emission in hydrostatic, constant-abundance models with diffusion // Astrophys. J. – 1993. – **406**. – P. 319–345.

[17] *Fontenla J. M., Avrett E., Thuillier G., Harder J.* Semiempirical models of the solar atmosphere. I. The quiet and active Sun photosphere at moderate resolution // Astrophys. J. – 2006. – **639**. – P. 441–458.

[18] *Fontenla J. M., Balasubramaniam K. S., Harder J.* Semiempirical models of the solar atmosphere. II. The quiet-Sun low chromosphere at moderate resolution // Astrophys. J. – 2007. – **667**. – P. 1243–257.

[19] *Gingerich O., de Jager C.* The Bilderberg model of the photosphere and low chromosphere // Solar Phys. – 1968. – **3**. – P. 5–25.

[20] *Gingerich O., Noyes R. W., Kalkofen W., Cuny Y.* The Harvard-Smithsonian reference atmosphere // Solar Phys. – 1971. – **18**. – P. 347–65.

[21] *Holweger H., Mueller E. A.* The photospheric barium spectrum – Solar abundance and collision broadening of Ba II lines by hydrogen // Solar Phys. – 1974. – **39**. – P. 19–30.

[22] *Kupka F., Piskunov N., Ryabchikova T. A., et al.* VALD-2: Progress of the Vienna atomic line data base // Astron. and Astrophys. Suppl. Ser. – 1999. – **138**. – P. 119–133.

[23] *Linsky J. L., Avrett E. H.* The Solar H and K Lines // Publs Astron. Soc. Pacif. – 1970. – **82**, N 485. – P. 169–248.

[24] *Lites B. W., Rutten R. J., Kalkofen W.* Dynamics of the solar chromosphere. Long-period network oscillations // Astrophys. J. – 1993. – **414**. – P. 345–356.

[25] *Maltby P., Avrett E. H., Carlsson M., et al.* A new sunspot umbral model and its variation with the solar cycle // Astrophys. J. – 1986. – **306**. – P. 284–303.

[26] *Neckel H.* Announcement Spectral atlas of solar absolute disk-averaged and disk-center intensity from 3290 to 12510 Å (Brault and Neckel, 1987) Now available from Hamburg Observatory anonymous ftp site // Solar Phys. – 1999. – **184**. – P. 421.

[27] *Rezaei R., Bruls J. H. M. J., Schmidt W., et al.* Reversal-free Ca II H profiles: a challenge for solar chromosphere modeling in quiet inter-network // Astron. and Astrophys. – 2008. – **484**. – P. 503–509.

[28] *Rutten R. J.* Solar atmosphere models // J. Astron. Data. – 2002. – **8**. – P. 1–80.

[29] *Rutten R. J., Uitenbroek H.* Ca II H (2v) and K (2v) cell grains // Solar Phys. – 1991. – **134**. – P. 15–71.

[30] *Ruiz Cobo B.* SIR: an inversion technique of spectral lines // Astrophys. and Space Sci. – 1998. – **263**. – P. 331–334.

[31] *Sheminova V. A., Rutten R. J., Rouppe van der Voort L. H. M.* The wings of Ca II H and K as solar fluxtube diagnostics // Astron. and Astrophys. – 2005. – **437**. – P. 1069–080.

[32] *Shine R. A., Linsky J. L.* A facular model based on the wings of the Ca II lines // Solar Phys. – 1974. – **37**. – P. 145–150.

[33] *Shine R. A., Milkey R. W., Mihalas D.* Resonance line transfer with partial redistribution. V. The solar Ca II lines // Astrophys. J. – 1975. – **199**. – P. 724–733.

[34] *Uitenbroek H.* Operator perturbation method for multi-level line transfer with partial redistribution // Astron. and Astrophys. – 1989. – **213**. – P. 360–370.

[35] *Vernazza J. E., Avrett E. H., Loeser R.* Structure of the solar chromosphere. II. The underlying photosphere and temperature-minimum region // Astrophys. J. Suppl. Ser. – 1976. – **30**. – P. 1–60.

[36] *Wedemeyer S., Freytag B., Steffen M., et al.* Numerical simulation of the three-dimensional structure and dynamics of the non-magnetic solar chromosphere // Astron. and Astrophys. – 2004. – **414**. – P. 1121–1137.