

УДК 523.9

М. И. Стодилка, А. И. Присяжный

Астрономическая обсерватория
Львовского национального университета имени Ивана Франко
ул. Кирилла и Мефодия 8, Львов, 79005
sun@astro.franko.lviv.ua

Диагностика атмосферы Солнца инверсионным неЛТР-методом: линия Ba II 455.403 нм

Решена обратная задача неравновесного переноса излучения в линии Ba II 455.403 нм с учетом сверхтонкой структуры и изотопического расщепления. На основе трехмерной гидродинамической модели выполнено исследование диагностических возможностей этой линии для изучения солнечной атмосферы. Показано, что использование инверсионных методов при анализе наблюдений в линии бария 455.403 нм позволяет воспроизводить физические условия в слоях фотосферы и нижней хромосферы ($0 < h < 600$ км) с коэффициентом корреляции порядка 0.9.

ДІАГНОСТИКА АТМОСФЕРИ СОНЦЯ ІНВЕРСІЙНИМ НЕЛТР-МЕТОДОМ: ЛІНІЯ Ba II 455.403 нм, Стоділка М. І., Присяжний А. І. — Розв'язано обернену задачу нерівноважного переносу випромінювання в лінії Ba II 455.403 нм з урахуванням надтонкої структури та ізотопічного розщеплення. На основі тривимірної гідродинамічної моделі проведено дослідження діагностичних можливостей цієї лінії для вивчення сонячної атмосфери. Показано, що використання інверсійних методів при аналізі спостережень у лінії барію 455.403 нм дозволяє відтворювати фізичні умови в шарах фотосфери та нижньої хромосфери ($0 < h < 600$ км) з коефіцієнтом кореляції порядку 0.9.

DIAGNOSTICS OF THE SOLAR ATMOSPHERE BY NON-LTE INVERSE METHOD: LINE OF Ba II 455.403 NM, by Stodilka M. I., Prysiazhnyi A. I. — We solved nonequilibrium radiative transfer inverse problem in the Ba II 455.403 nm line with the hyperfine structure and isotope splitting taken into account. Based on three-dimensional hydrodynamic model of the solar atmosphere, we performed a research to determine the diagnostic capabilities of the Ba II 455.403 nm line for studying the structure and dynamics of the solar atmosphere. It is shown that inverse technique used for

the analysis of the observed Ba II 455.403 nm line allows to reproduce physical conditions in the photosphere and lower chromosphere layers ($0 < h < 600$ km) with a correlation coefficient of about 0.9.

ВВЕДЕНИЕ

Солнечный спектр содержит несколько линий нейтрального и линии ионизированного бария. Среди этих линий особый интерес представляют две линии: 455.403 нм и 649.690 нм, которые отличаются высокой чувствительностью к физическим параметрам солнечной атмосферы — от нижней фотосферы до нижней хромосферы, включая область температурного минимума. Ввиду большой атомной массы бария спектральные линии этого элемента чувствительны в первую очередь к конвективным и волновым движениям, и в гораздо меньшей степени — к тепловым скоростям. В солнечном спектре эти линии слабо блендированы. Кроме того, содержание бария на Солнце и звездах является важным источником информации о химической эволюции галактик.

Исследования солнечного спектра бария начались в 1960-х гг.: основной акцент был сделан на определении содержания бария в приближении локального термодинамического равновесия (ЛТР) [10, 11, 17]. Позже была показана важная роль неЛТР-эффектов в образовании резонансной линии Ba II 455.403 нм [27, 28]. Наиболее полное исследование бария в спектре Солнца было выполнено в работах [18, 20—23]: оказалось, что функция источников для линии 455.403 нм значительно отличается от функции Планка. Кроме того, выяснилось, что при расчете профиля поглощения этой линии необходимо учитывать сверхтонкую структуру и изотопическое смещение, а при наблюдениях на краю солнечного диска становятся существенными эффекты когерентного рассеяния.

Сюттерлин и др. [26] провели анализ конвективных движений с высоким пространственным разрешением, используя бариевый фильтр, установленный на Шведском вакуумном башенном телескопе. Позже вышел цикл работ Р. И. Костыка, Н. Г. Щукиной, Е. В. Хоменко и В. Л. Ольшевского [12, 13, 18, 23]. На основании детального анализа неЛТР-образования линии 455.403 нм в одномерных (1D) и трехмерных (3D) моделях солнечной атмосферы авторы показали, что так называемый метод μ -метра является хорошим диагностическим инструментом для исследования поля скоростей от нижней фотосферы до нижней хромосферы.

В работе [13] на основе наблюдений на Немецком вакуумном башенном телескопе (VTT) в линии Ba II 455.403 нм исследованы статистические свойства конвективных ячеек и предложена колончатая модель солнечной грануляции.

В работе [12] на основе комплексных двухмерных наблюдений в линиях Ba II 455.403 нм и Fe I 156.0 нм исследованы свойства со-

лнечной грануляции в факельных площадках и показано, что магнитное поле факела стабилизирует конвекцию и обеспечивает более эффективный перенос энергии в верхние слои атмосферы.

В работах [15, 16] исследована чувствительность избранных линий Fe I, Fe II, Cr I, Ba II, включая линию 455.403 нм, к вариациям лучевой скорости в спокойной атмосфере Солнца.

Спектрополяриметрические наблюдения Солнца [9] обнаружили высокую линейную поляризацию излучения в линии Ba II 455.403 нм на лимбе Солнца. Этот факт возродил интерес к данной линии, так как она может быть использована для изучения мелкомасштабных магнитных полей с помощью эффекта Ханле. Впоследствии Фаробер [8] выполнила неЛТР-моделирование резонансной поляризации в линии Ba II 455.403 нм. Сравнение результатов моделирования с наблюдениями на французско-итальянском телескопе THEMIS позволило оценить значение магнитного поля в нижней атмосфере (~ 3 мТл). В 2013 г. Белуччи и Трухильо Буэно [5] исследовали линейную поляризацию в резонансных линиях D₁ Na I 589.6 нм и Ba II 493.4 нм. Наиболее полное исследование линейной поляризации в линии Ba II 455.403 нм было проведено в работе [24]. Было показано, что наблюдаемая на краю диска линейная поляризация в линии 455.403 нм обусловлена эффектами интерференции F-состояния для нечетных изотопов бария, а для объяснения наблюдаемой поляризации в крыльях линии Ba II 455.403 нм необходимо учитывать частичное перераспределение по частотам.

Ввиду высокого диагностического потенциала линии Ba II 455.403 нм особый интерес представляет разработка новых методов анализа наблюдений данной линии. Одним из таких методов является инверсионный подход к анализу данных спектральных наблюдений [2, 3, 7, 25]. До сих пор, насколько нам известно, такой подход при анализе наблюдений данной линии не применялся. На сегодня нет исследований, которые бы выяснили, насколько информативными могут быть инверсионные методы, если их использовать при анализе линии Ba II 455.403 нм.

Цель нашей работы — провести именно такое исследование. В будущем мы планируем применить разработанную методику для анализа наблюдений с высоким пространственным разрешением.

РЕШЕНИЕ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ ПЕРЕНОСА ИЗЛУЧЕНИЯ

Модель неоднородной атмосферы Солнца была восстановлена путем решения обратной задачи переноса излучения. Обратная задача принадлежит к числу некорректных задач, поскольку существует определенное множество решений, удовлетворяющих определенному критерию, по которому находят решения. Мы предложили для обеспечения гладкости и устойчивости решений обратной задачи использовать так

называемые тихоновские стабилизаторы, которые модифицируют целевую функцию [3]:

$$J_{reg}^2 = J^2 + \lambda S(x),$$

где J^2 — стандартная целевая функция, описывающая расстояние между профилями линий, λ — параметр регуляризации, $S(x)$ — тихоновский стабилизатор, учитывающий *a priori* информацию о решении x : тип зависимости, физику процесса, совокупность определенных ограничений и т. п., а x — безразмерный параметр модели. Параметр регуляризации определялся из условия наилучшего воспроизведения параметров заданной модели с требованием независимости решений от начальных оценок и отсутствия осцилляций решений.

Из условия минимума целевой функции получаем поправки к текущим значениям параметров модели:

$$\Delta x = - \frac{D(x_0)^{-1} \nabla J(x_0)}{2 H(x_0)}.$$

Здесь D — матрица Гессе, H — матричное представление стабилизатора.

Сам вид стабилизаторов и коэффициенты регуляризации были подобраны с помощью тестовой задачи, позволившей воспроизвести гидродинамическую 3D-модель Асплунда [4] путем инверсии профилей линии Ва II 455.403 нм, рассчитанных для данной модели атмосферы.

Кроме того, в хромосферных слоях, где линия нечувствительна к вариациям физических параметров среды, стабилизаторы позволили обеспечить плавный переход воспроизведенных скоростей к скоростям, полученным методом τ -метра [14] по смещениям центра линии, а также температуры — к значениям согласно усредненной модели спокойного Солнца Асплунда [4]. Такие стабилизаторы снимают проблему наличия ложных узких пиков в воспроизведенных параметрах модели.

В качестве начального приближения мы использовали модель атмосферы спокойного Солнца [4], для которой решали прямую задачу неравновесного переноса излучения. Полученные неЛТР-параметры использовались в качестве входных параметров в обратной задаче, решение которой дает уточненную модель атмосферы. Вычислительный процесс итерационно повторялся до достижения критерия сходимости решения. Более подробное описание нашего кода можно найти в работах [2, 3].

МОДЕЛЬ АТОМА БАРИЯ

Модель атома бария заимствована из [18] и дополнена новыми данными для сил осцилляторов из базы данных VALD (<http://vald.astro.uu>).

se). Модель включает 40 уровней, два из которых принадлежат Ba I, 99 связанно-связанных и 39 связанно-свободных переходов.

Сечения фотоионизации для уровней с орбитальными квантовыми числами $l = s, p, d, f$ были рассчитаны на основании метода квантового дефекта [6, 19], для остальных уровней Ba II — в водородоподобном приближении. Скорости ударных связанно-связанных переходов для разрешенных переходов рассчитывались по формуле Регемортера [1], для запрещенных переходов мы использовали полуклассическое определение сечения через силу электронного удара [1]. Скорости ионизации в результате электронных столкновений описывались соотношением Лотца [1]. Заметим, что скорости ударных переходов для некоторых переходов известны с точностью до 30—100 % [18]. Тем не менее, столь большие различия приводят к незначительным изменениям населенностей уровней атома бария (всего лишь на несколько процентов) [18].

Резонансная линия Ba II 455.403 нм имеет сложную структуру. Известно, что барий имеет семь стабильных изотопов (см., например, базу данных атомных спектров NIST <http://www.nist.gov/pml/data/asd.cfm>). Из них только два (Ba^{135} , Ba^{137}) имеют ненулевой спин ядра, что приводит к расщеплению нижнего уровня перехода на два подуровня, а верхнего — на четыре. Поэтому линия для этих двух изотопов расщепляется (с учетом правил отбора) на шесть компонентов.

Таким образом, линия Ba II 455.403 нм из-за наличия сверхтонкой структуры и изотопических сдвигов состоит из 17 собственных компонентов [18]. Слабые бленды, находящиеся в крыльях линии, мы не рассматривали.

РАСЧЕТ МОДЕЛИ СОЛНЕЧНОЙ АТМОСФЕРЫ

В данной работе мы использовали гидродинамическую 3D-модель солнечной атмосферы Асплунда и др. [4] для одного момента времени. Моделируемая область имеет размер 50×50 точек сетки в горизонтальной плоскости с разрешением 120 и 20 км — по вертикали. Протяженность области по высоте составила 800 км. Дно используемой модели расположено на уровне формирования континуума.

В расчетах мы пренебрегали эффектами горизонтального переноса, поэтому данную модель можно рассматривать как набор 2500 одномерных моделей. Для каждой из этих 1D-моделей мы решили многоуровневую (нелТР) задачу переноса излучения в линии бария Ba II 455.403 нм. В результате мы получили набор нелТР-профилей данной линии. Полученные профили были использованы в качестве входных данных при решении обратной задачи переноса излучения. В результате мы восстановили модель неоднородной атмосферы Солнца. Сравнение первоначальной модели с восстановленной позволяет оценить качество воспроизведения.

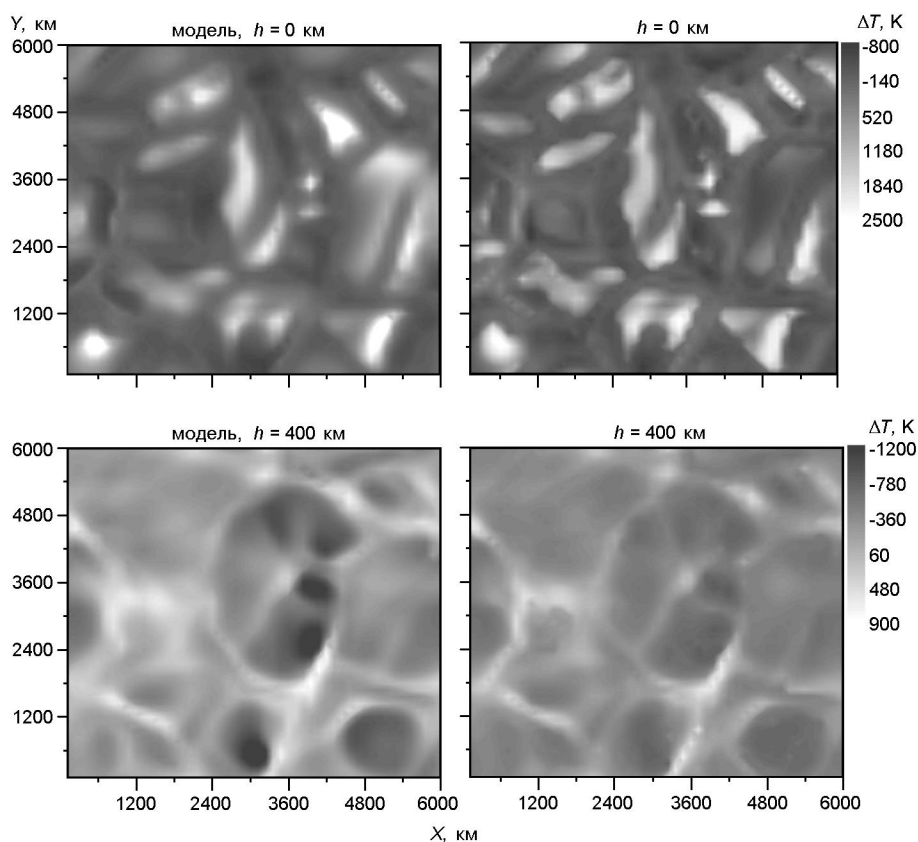


Рис. 1. Первоначальные (модель Асплунда) и воспроизведенные (справа) вариации температуры на двух высотах солнечной фотосферы: $h = 0$ км и $h = 400$ км

Воспроизведенные вариации температуры ($T_{i,j}(h) = T_{i,j}(h)$) $\bar{T}(h)$, где $\bar{T}(h)$ — среднее значение температуры на высоте h) и вариации лучевой скорости показаны на рис. 1 и 2 соответственно. Результаты приведены для двух высот солнечной атмосферы: $h = 0$ км и $h = 400$ км.

Светлым тонам на рис. 1 соответствуют положительные, а темным — отрицательные вариации температуры. Структура потоков воспроизводится достаточно хорошо как в верхних, так и в нижних слоях атмосферы. Правда, в верхних слоях качество воспроизведения падает — плохо воспроизводятся небольшие локальные участки с резким понижением температуры — им соответствуют динамичные (большие градиенты скорости) потоки малых масштабов с инверсией параметров. Тем не менее, отчетливо воспроизводится инверсия вариаций температуры, которая, как известно, присуща верхним слоям фотосферы.

Лучевые скорости показаны на рис. 2. Восходящим потокам соответствуют светлые тона (отрицательные лучевые скорости), нисходящим — темные. В нижних слоях фотосферы даже в относительно узких участках поверхности — междугранулах имеет место почти иде-

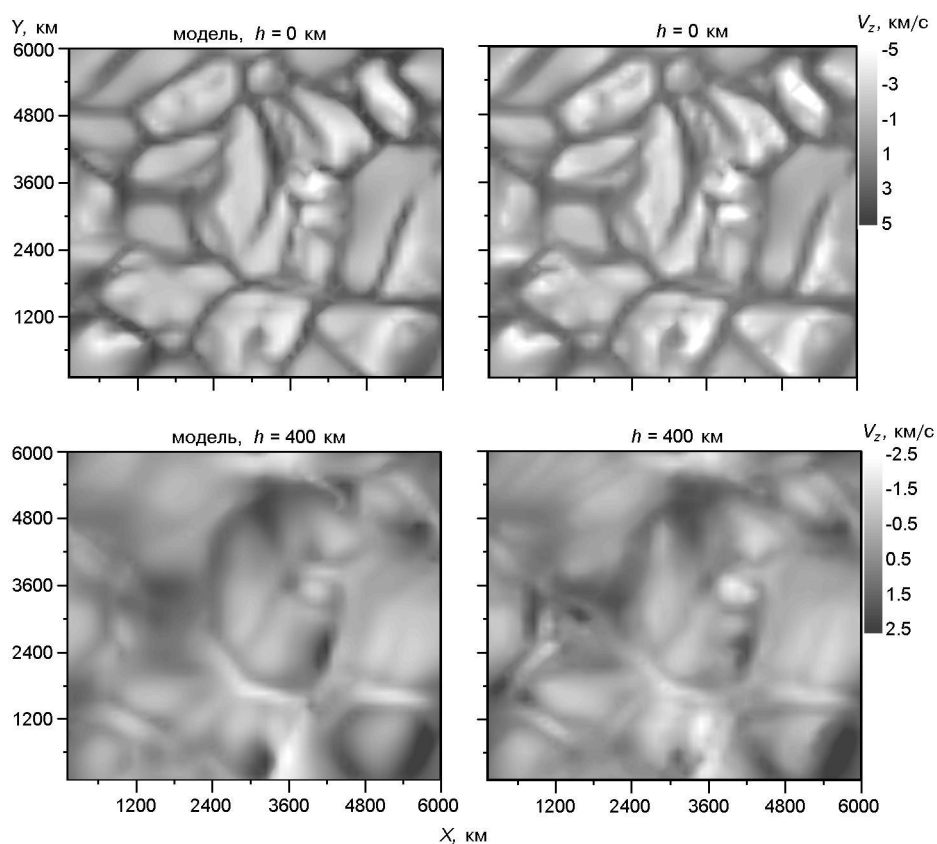


Рис. 2. Первоначальные (модель Асплунда) и воспроизведенные (справа) вариации лучевой скорости на двух высотах солнечной фотосферы: $h = 0$ км и $h = 400$ км

альное воспроизведение скорости. С высотой качество воспроизведения скорости падает.

Рис. 1 и 2 дают лишь качественное представление корреляции восстановленных и реальных значений температуры и скорости.

На рис. 3 мы приводим зависимости между модельными (первоначальными) значениями температуры и скорости и восстановленными значениями. Такие зависимости дают количественную оценку корреляции, причем отдельно для гранул и междугранул. Согласно приведенным на рис. 3 данным решение обратной задачи переноса излучения приводит к недооценке вариаций параметров модели: температуры в верхних слоях гранул (из-за инверсии вариации температуры в гранулах преимущественно отрицательны) и лучевой скорости в нижних слоях междугранул.

В качестве количественной меры достоверности воспроизведения физических условий в атмосфере Солнца мы выбрали общеизвестный коэффициент корреляции по Пирсону.

В таблице приведены коэффициенты корреляции между первоначальными и воспроизведенными параметрами модели (температура,

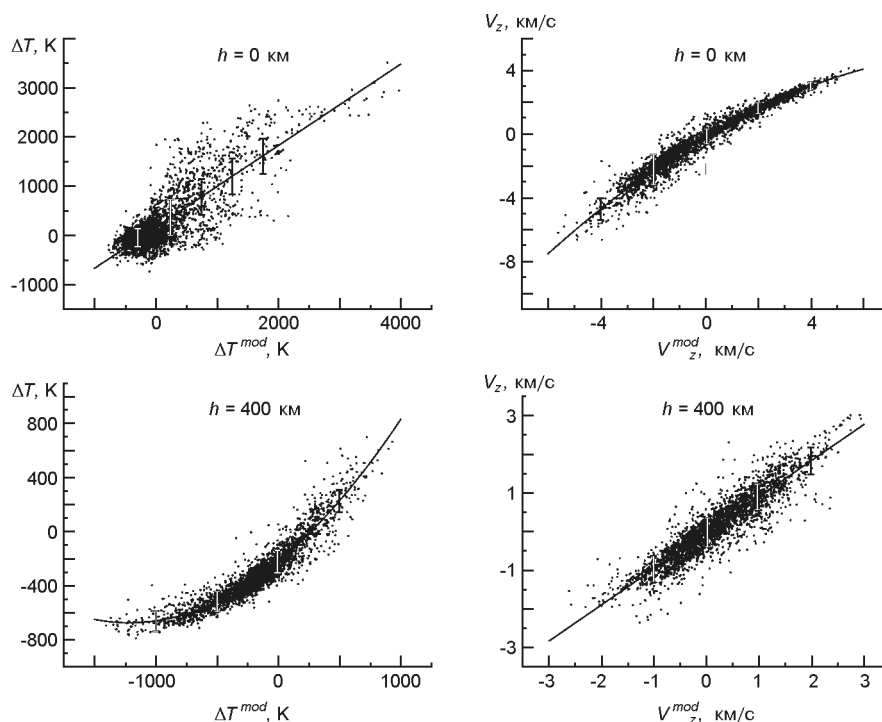


Рис. 3. Коррелятивные зависимости между восстановленными значениями вариаций температуры (слева) и лучевой скорости (справа) и первоначальными значениями (модель Асплунда) на высотах $h = 0$ км и $h = 400$ км, вертикальным отрезкам соответствуют стандартные отклонения

Корреляция между известными (T^{mod} и V_z^{mod}) и воспроизведенными значениями (T и V_z)

h , км	T_{mod}	$V_{z,mod} V_z$
600	0.74	0.90
400	0.91	0.92
200	0.76	0.94
100	0.58	0.96
0	0.81	0.97

лучевая скорость) на разных высотах атмосферы Солнца (диапазон высот определяется глубинами образования избранной линии).

Как видим, для лучевой скорости есть тенденция уменьшения достоверности ее воспроизведения с высотой, что связано с тем, что мы не можем полностью воспроизвести динамический компонент давления, который определяется как вертикальными, так и горизонтальными скоростями. Качество воспроизведения вариаций температуры зависит от еще одного фактора — температурной инверсии. Вариации температуры в слоях, где осуществляется ее инверсия — минимальны. Поэтому для этих слоев ($h = 100$ км) увеличивается ошибка воспроизведения температурных вариаций и соответствующий коэффициент корреляции равен 0.58.

ВЫВОДЫ

Мы решили прямую и обратную задачу неравновесного переноса излучения в линии Ba II 455.403 нм. При решении обратной задачи использовались стабилизаторы Тихонова. Расчет данной линии проводился с учетом сверхтонкой структуры и изотопического расщепления.

На основании гидродинамической 3D-модели атмосферы Солнца мы провели исследования, которые показали, что инверсионные методы в применении к данной линии являются хорошим диагностическим инструментом при изучении термодинамической структуры фотосферы и нижних слоев хромосферы Солнца. При воспроизведении лучевых скоростей коэффициент корреляции между заданными и воспроизведенными скоростями превышает значение 0.9 на высотах $0 < h < 600$ км, причем с высотой коэффициент корреляции уменьшается. При воспроизведении вариаций температуры коэффициент корреляции минимален в области температурной инверсии — в этих слоях вариации температуры наименьшие, вследствие чего увеличивается ошибка воспроизведения.

1. *Вайнштейн Л. А., Собельман И. И., Юков Е. А.* Возбуждение атомов и уширение спектральных линий. — М: Наука, 1979.—320 с.
2. *Стоділка М. І.* Інверсна задача для дослідження неоднорідностей атмосфери Сонця та зір // Журн. фіз. досліджень.—2002.—**6**, № 4.—С. 435—442.
3. *Стоділка М. І.* Тихонівські стабілізатори в інверсних задачах спектральних досліджень // Кинематика и физика небес. тел.—2003.—**19**, № 4.—С. 334—343.
4. *Asplund M., Ludwig H. G., Nordlund A., Stein R. F.* The effects of numerical resolution on hydrodynamical surface convection simulations and spectral line formation // *Astron. and Astrophys.*—2000.—**359**, N 2.—P. 669—681.
5. *Belluzzi L., Trujillo Bueno J.* A key physical mechanism for understanding the enigmatic linear polarization of the solar Ba II and Na I D₂ lines // *Astrophys. J. Lett.*— 2013.—**774**, N 2.—P. L28.—P. 1—5.
6. *Burgess A., Seaton M. J.* A general formula for the calculation of atomic photoionization cross-sections // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—1960.—**120**— P. 121—151.
7. *de la Cruz Rodriguez J., Socas-Navarro H., Carlsson M., Leenaarts J.* Non-local thermodynamic equilibrium inversions from a 3D magnetohydrodynamic chromospheric model // *Astron. and Astrophys.*—2012.—**543**—id. A34.—13 p.
8. *Faurobert M., Bommier V., Derouich M.* Non-LTE modeling of the Ba II D₂ line resonance polarization // *ASP Conf. Ser.*—2009.—**405**—P. 35—40.—(Solar Polarization 5: In Honor of Jan Olof Stenflo / Eds S. V. Berdyugina, K. N. Nagendra, and Renzo Ramelli).
9. *Gandorfer A.* The Second Solar Spectrum: A high spectral resolution polarimetric survey of scattering polarization at the solar limb in graphical representation. — Zürich: vdt Hochschulverlag, 2002.—Vol. II: 3910 Å to 4630 Å.
10. *Goldberg L., Müller E. A., Aller L. H.* The abundances of the elements in the solar atmosphere // *Astrophys. J. Suppl. Ser.*—1960.—**5**—P. 1.
11. *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.

12. *Kostik R., Khomenko E. V.* Properties of convective motions in facular regions // *Astron. and Astrophys.*—2012.—**545**.—A22.—P. 1—9.
13. *Kostik R., Khomenko E., Shchukina N.* Solar granulation from photosphere to low chromosphere observed in Ba II 4554 Å line // *Astron. and Astrophys.*—2009.—**506**, N 3.—P. 1405—1414.
14. *Kostyk R. I., Shchukina N. G., Khomenko E. V.* Fine structure of wave motions in the solar photosphere: Observations and theory // *Astron. Rep.*—2006.—**50**, N 7.—P. 588—600.
15. *Koza J.* Sensitivity of selected Ba II, Fe I, Fe II, and Cr I spectral lines to velocity in quiet solar atmosphere // *Solar Phys.*—2010.—**266**, N 2.—P. 261—275.
16. *Koza J.* The spectral line Ba II 6497 Å as a sensitive Doppler diagnostics // *Contrib. Astron. Observ. Skalnaté Pleso.*—2011.—**41**, N 2. — P. 167—174.
17. *Lambert D. L., Warner B.* The abundances of the elements in the solar photosphere. V. The alkaline earths Mg, Ca, Sr, Ba // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—1968.— **140**, N 2.—P. 197—221.
18. *Olshevskiy V. L., Shchukina N. G., Vasilyeva I. E.* NLTE Formation of the Resonance Ba II Line 455.4 nm in the Solar Atmosphere // *Kinematics and Physics of Celestial Bodies.*—2008.—**24**, N 3.—P. 145—158.
19. *Peach G.* A revised general formula for the calculation of atomic photoionization cross sections // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—1967.—**71**.—P. 13—27.
20. *Rutten R. J.* Extreme limb observations of Ba II 4554 and Mg I 4571 // *Solar Phys.*—1977.—**51**.—P. 3—24.
21. *Rutten R. J.* Empirical NLTE analyses of solar spectral lines. II. The formation of the Ba II 4554 resonance line // *Solar Phys.*—1978.—**56**.—P. 237—262.
22. *Rutten R. J., Milkey R. W.* Partial redistribution in the solar photospheric Ba II spectrum // *Astrophys. J.*—1979.—**231**, N 1.—P. 277—283.
23. *Shchukina N. G., Olshevsky V. L., Khomenko E. V.* The solar Ba II 4554 Å line as a Doppler diagnostic: NLTE analysis in 3D hydrodynamical model // *Astron. and Astrophys.*—2009.—**506**, N 3.—P. 1393—1404.
24. *Smitha H. N., Nagendra K. N., Stenflo J. O., Sampoorana M.* The role of quantum interference and partial redistribution in the solar Ba II D₂ 4554 Å line // *ASP Conf. Ser.*—2014.—**489**.—P. 213.
25. *Socas-Navarro H., de la Cruz Rodriguez J., Asensio Ramos A., et al.* An open-source, massively parallel code for non-LTE synthesis and inversion of spectral lines and Zeeman-induced Stokes profiles // *Astron. and Astrophys.*—2015.—**577**.—id. A7.—10 p.
26. *Sütterlin P., Rutten R. J., Skomorovsky V. I.* Ba II 4554 Å speckle imaging as solar Doppler diagnostic // *Astron. and Astrophys.*—2001.—**378**.—P. 251—256.
27. *Tandberg-Hanssen E.* The equilibrium of Barium in the solar atmosphere // *Astrophys. J. Suppl. Ser.*—1964.—**9**.—P. 107.
28. *Tandberg-Hanssen E., Smythe C.* The excitation of ionized Barium in the chromosphere // *Astrophys. J.*—1970.—**161**.—P. 289—302.

Статья поступила в редакцию 17.04.15