

УДК 523.942

Просторові варіації еквівалентних ширин ліній нейтрального заліза в сонячній грануляції

М. І. Стоділка

Астрономічна обсерваторія Львівського національного університету імені Івана Франка
79005 Львів, Кирила й Мефодія, 8

Використовуючи метод прискореної Λ -ітерації, розв'язано двовимірну (2D) нерівноважну задачу переносу випромінювання для квазістаціонарної та повністю нестационарної моделей сонячної грануляції. Розрахунок ліній нейтрального заліза зроблено для 21-рівневої моделі атома. При обчисленні реальних профілів ліній враховувались доплерівські зсуви (обумовлені конвективними рухами речовини) профілів коефіцієнта поглинання вздовж поширення променя. Досліджено просторові варіації еквівалентних ширин W сильної, помірної та двох слабких ліній Fe I ($\lambda\lambda$ 388.625, 525.021, 670.357 та 671.032 нм), які утворюються на різних глибинах сонячної атмосфери. Просторові варіації еквівалентних ширин над гранульно-міжгранульними областями чутливі до не-ЛТР-ефектів, обумовлених переважно фотоіонізаційними процесами: не-ЛТР-моделювання дає незначний від'ємний нахил залежності W від інтенсивності I_c в неперервному спектрі, тоді як ЛТР-розрахунок — додатний. Показано, що в 2D-моделях завищена взаємодія нисхідних потоків, що дає завищений (від'ємний) коефіцієнт кореляції між W та I_c при не-ЛТР-дослідженнях. Ефекти відхилення від ЛТР послаблюють еквівалентні ширини ліній у гранулі, згладжують їхні флуктуації. Збіднення рівнів Fe I УФ-випромінюванням призводить до зменшення інтервалу висот, на яких утворюється лінія, внаслідок чого не-ЛТР-профілі ліній заборонених переходів більш чутливі до локальних умов і відображають стан глибших шарів атмосфери.

ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ ВАРИАЦИИ ЭКВИВАЛЕНТНЫХ ШИРИН ЛИНИЙ НЕЙТРАЛЬНОГО ЖЕЛЕЗА В СОЛНЕЧНОЙ ГРАНУЛЯЦИИ, Стоділка М. И. — Используя метод ускоренной Λ -итерации, решена (2D) неравновесная задача переноса излучения для квазистационарной и полностью нестационарной моделей солнечной грануляции. Расчет линий нейтрального железа выполнен для 21-уровневой модели атома. При вычислении реальных профилей линий учитывались доплеровские сдвиги (обусловленные конвективными движениями вещества) профилей коэффициента поглощения вдоль распространения луча. В работе выполнено исследование пространственных вариаций эквивалентных ширин W сильной, умеренной и двух слабых линий Fe I ($\lambda\lambda$ 388.625, 525.021, 670.357 и 671.032 нм), которые образуются на разных глубинах солнечной атмос-

феры. Пространственные вариации эквивалентных ширин над гранульно-междугранульными областями чувствительны к не-ЛТР-эффектам, обусловленным главным образом фотоионизационными процессами: не-ЛТР-моделирование дает незначительный отрицательный наклон зависимости W от интенсивности I_c в непрерывном спектре, тогда как ЛТР-расчет — положительный. Показано, что в 2D-моделях завышено взаимодействие нисходящих потоков, что дает завышенный (отрицательный) коэффициент корреляции между W и I_c при не-ЛТР-исследовании. Эффекты отклонения от ЛТР ослабляют эквивалентные ширины линий в грануле, сглаживают их флюктуации. Истощение уровней Fe I УФ-излучением приводит к уменьшению интервала высот, на которых образуется линия, вследствие чего не-ЛТР-профили линий запрещенных переходов более чувствительны к локальным условиям и отображают состояние более глубоких слоев атмосферы.

SPATIAL VARIATIONS OF THE EQUIVALENT WIDTHS OF NEUTRAL IRON LINES IN THE SOLAR GRANULATION, by Stodilka M. I. — Using accelerated Λ -iteration method, we solved 2D nonequilibrium radiation transfer problem for quasi-stationary and fully nonstationary solar granulation models. Neutral iron lines were calculated for a 21-level atom model. We took into account the Doppler shifts of the absorption coefficient profiles (due to convective motions) along the ray path. We studied the spatial variations of the equivalent widths (W) for four lines: $\lambda\lambda$ 388.625, 525.021, 670.357, and 671.032 nm — strong, moderate, and two weak ones, correspondingly, which are formed in different layers of the solar atmosphere. The spatial variations of the equivalent widths over granular—intergranular regions are sensitive to non-LTE effects due to photoionization processes: the non-LTE modelling produces a small negative slope in the equivalent width — continuum intensity dependence, while the LTE calculation produces a positive slope. It is shown that the interaction of descending flows is overestimated, which leads to a stronger negative correlation between the equivalent width and intensity in the non-LTE modelling. The non-LTE effects make weaker the equivalent widths of spectral lines in granules and filter their fluctuations. The depletion of Fe I levels by the UV radiation leads to a smaller height interval where the line is formed, and that is why the non-LTE line profiles for forbidden transitions are more sensitive to local conditions and reflect the conditions in deeper atmosphere layers.

ВСТУП

При дослідженні зір сонячного типу, вивченні спектрів сонячній грануляції з високою просторовою роздільною здатністю тощо необхідно розв'язувати задачу врахування впливу ефектів відхилення від ЛТР на утворення ліній. У сонячному спектрі найбільше ліній заліза, і за своїми інтенсивностями вони займають одне із перших місць (поряд з лініями водню та кальцію). В умовах термодинамічної рівноваги (гідродинамічні моделі) еквівалентні ширини ліній заліза посилюються в області гранул, а у міжгранульних областях, навпаки, послаблюються [4]. Результати моделювання в більш реальних нерівноважних умовах показують обернену залежність [15]. Спостереження свідчать про слабку залежність еквівалентної ширини ліній Fe I від інтенсивності в неперервному спектрі, або ж про її відсутність взагалі [14, 15].

В роботах [3, 13] розглянуто особливості ЛТР-утворення ліній в рамках різних моделей грануляції: квазістаціонарних та нестаціонарних (вони побудовані на різних базових припущеннях). Гадун показав, що для

нестационарних моделей, що змінюються з часом, кореляція між еквівалентною шириною та інтенсивністю осцилює біля нуля (коли враховувати просторове замивання при моделюванні профілів); вона є як від'ємною, так і додатною. Такі розбіжності обумовлені різною стратифікацією флуктуацій термодинамічних характеристик використовуваних моделей [3].

Грунтовне дослідження впливу ефектів відхилення від ЛТР на утворення ліній заліза в рамках однорідних моделей атмосфери Сонця проведено в циклі робіт Щукіної [7—9, 19]; розрахунки спектру Fe I зроблено для реалістичної моделі атома, що включає понад 250 рівнів. В цих роботах вивчено статистичні закономірності поведінки похибок висот утворення, функцій джерела, еквівалентних ширин і центральних глибин ліній Fe I, які виникають при використанні ЛТР-гіпотези; досліджено наслідки застосування ЛТР-гіпотези для інверсійної процедури відновлення температури по лініях Fe I; показано, що ЛТР наближення при відтворенні температурної структури атмосфери по лініях Fe I дає параметричну залежність похибок температури від висоти утворення ліній; досліджено вплив відхилення від ЛТР на визначення вмісту заліза за лініями Fe I, похибки визначення вмісту при цьому залежать від потенціалу збудження нижнього рівня та від висоти утворення досліджуваних ліній.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Тут ми розглядаємо просторові варіації еквівалентних ширин ліній нейтрального заліза над гранульно-міжгранульними областями. Ці варіації відображають стратифікацію та градієнти температури, заселеностей рівнів, нетеплових швидкостей; вони чутливі до не-ЛТР-ефектів. Адже ж температура в гранулі (в області утворення континууму) на кілька тисяч градусів вища від температури за однорідними моделями, що впливає на стан холодніших шарів, які знаходяться вище.

Дослідження ліній нейтрального заліза проведено в рамках квазістационарних та нестационарних 2D-моделей сонячної грануляції [2, 4]. У квазістационарних моделях конвективні рухи описуються у масштабі однієї гранули в наближенні квазістационарної чарункової плоскої конвекції. Для таких моделей характерна завищена ламінаризація потоків. В послідовності нестационарних моделей термічна конвекція описується як повністю нестационарна з системою потоків різних масштабів, що взаємодіють між собою, за рахунок чого у верхній фотосфері можуть виникати дрейфові горизонтальні потоки, що впливають на стовпчасту структуру вертикальних швидкостей. Такі моделі відтворюють осциляції, в них можуть виникати ударні хвилі. Дослідження характеристик штучних гранул показало, що нестационарні моделі правильно відтворюють спостережувані дані.

Ми розглянули лише по одному скану із часової послідовності згаданих моделей. Сонячна грануляція представлялась у вигляді нескінченної періодичної структури. У квазістационарній моделі досліджувана область мала

Таблиця 1. Атомні дані вибраних ліній

λ , нм	EPL, eV	Нижній рівень		Верхній рівень		Сила осцилятора f	W, пм
		терм	g	терм	g		
388.629	0.05	a^5D	7	z^5D^0	7	$1.20 \cdot 10^{-2}$	92
525.021	0.12	a^5D	1	z^7D^0	3	$1.26 \cdot 10^{-5}$	6.49
670.357	2.76	b^3F	7	y^3F^0	7	$1.202 \cdot 10^{-4}$	3.69
671.032	1.49	a^3F	9	z^5F^0	11	$1.465 \cdot 10^{-6}$	1.35

розміри $1344 \text{ км} \times 1120 \text{ км}$ і представлялась двовимірним масивом 41×41 . У *нестационарній* моделі область моделювання задавалась двовимірним масивом 121×41 , що відповідає розмірам $3360 \text{ км} \times 1120 \text{ км}$.

Розрахунок ліній нейтрального заліза зроблено для 21-рівневої моделі атома, яка включає 18 структурованих по термах рівнів Fe I з потенціалами збудження від 0 до 4.75 eV, два нижні терми іона Fe II, та основний рівень Fe III. Терми, що перекриваються, ми об'єднували в один рівень. Перерізи ударних та фотоіонізаційних переходів брались з робіт [10, 16]. Розглядались чотири лінії, що утворюються на різних глибинах: сильна λ 388.629 нм, помірна λ 525.021 нм, та дві слабкі: $\lambda\lambda$ 670.357 і 671.032 нм. Три останні лінії заборонені. Деякі характеристики синтезованих спектральних ліній приведені в табл. 1 (g — статистична вага рівня). Атомні дані для Fe I брались з робіт [5, 10, 18].

МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ

В цій роботі послідовно розв'язана не-ЛТР-задача двовимірного переносу випромінювання методом прискореної Λ -ітерації [6, 9, 11] із використанням методу коротких характеристик для формального розв'язку, прискорення збіжності, множинних сіток. Останні дозволяють фільтрувати довгоперіодичні осциляції розв'язку, що також покращує збіжність ітераційної процедури.

При обчисленні реальних профілів ліній ми враховували доплерівські зсуви (обумовлені конвективними рухами речовини) профілів коефіцієнта поглинання вздовж променя (внаслідок чого отримувались профілі асиметричні і розширені турбулентними рухами речовини, а отже відпадає потреба вводити підгоночні параметри типу мікро- та макротурбулентності), а також ван-дер-ваальсівське та штарківське розширення ліній за рахунок взаємодії з атомами водню та електронами.

Просторове замивання профілів інструментального походження ми враховували шляхом згортки з двома функціями Лоренца з параметрами 180 км та 1800 км згідно з методикою Нордлунда [17]. Така модель враховує наддовгі крила реальної функції замивання. Замивання суттєво зменшує флуктуації поля випромінювання.

ОТРИМАНІ РЕЗУЛЬТАТИ

Для обох моделей ми розв'язали двовимірну задачу переносу випромінювання з урахуванням ефектів відхилення від ЛТР; тобто заселеності рівнів в кожній точці атмосфери визначаються полем випромінювання, що поширюється у різних напрямках. Таким чином враховуються горизонтальні ефекти, чого не дозволяє зробити 1.5D-моделювання (одновимірне перенесення випромінювання у двовимірній моделі грануляції). Профілі ліній в центрі диску отримували шляхом формального розв'язку рівняння переносу для кожної із вертикальних колонок, використовуючи при цьому нерівноважні (2D) значення заселеностей рівнів. Аналогічно отримуються профілі на краю диску: промені при поширенні назовні перетинатимуть вертикальні колонки.

За рівень континууму вибирався локальний рівень неперервного спектру. За профілями визначались еквівалентні ширини ліній. Еквівалентна ширина лінії — це інтегральна характеристика, яка визначається сумарним вкладом різних частків профіля лінії, інтенсивності яких формуються на різних глибинах: ядра — у вищих, а крила — у нижчих шарах атмосфери Сонця. А просторові варіації еквівалентних ширин визначаються розподілом

Таблиця 2. Глибини утворення ліній

λ , нм	h_l , км				
	центр лінії (ЛТР)		центр лінії (не-ЛТР)		крило (континуум)
388.629	750		642		-100
525.021	290		176		-80
670.357	61		6		-68
671.032	-25		-44		-64

температурних градієнтів, концентрацією агентів селективного поглинання, нетепловими швидкостями в області утворення ліній.

В табл. 2 приведено усереднені по поверхні глибини утворення випромінювання (нестационарна модель грануляції) в центрі лінії та в континуумі для чотирьох різних по інтенсивності ліній, отриманих в наближенні ЛТР та з урахуванням не-ЛТР-ефектів. Глибини утворення порашовані по функціях вкладу в емісію [1]. За нуль шкали геометричних глибин брали шар, де середня росселандівська оптична глибина дорівнює одиниці. Якщо ж за глибину утворення випромінювання брати ті шари, де $\tau_\nu = 1$, то глибини дещо зміщуються в сторону нижніх шарів атмосфери. Так, для λ 670.357 нм згідно з даним критерієм лінія утворюється в шарах -3...-102 км (не-ЛТР-значення).

Для заборонених переходів для Fe I функція джерела практично рівна функції Планка в області утворення ліній, тому можна вважати, що інтенсивність випромінювання визначається в основному температурним станом тих шарів, де утворюється випромінювання. Не-ЛТР-ефекти приводять до збіднення рівнів Fe I у верхній частині області моделювання, внаслідок чого лінії утворюються в дещо нижчих шарах атмосфери.

Як видно з табл. 2, інтервал висот утворення лінії стає суттєво вужчим через ефекти відхилення від ЛТР. Так, для слабкої лінії λ 670.357 нм ширина середньої області, в якій вона утворюється, становить 129 км (ЛТР) і 74 км (не-ЛТР), а для лінії λ 671.032 нм — відповідно 39 і 20 км. Внаслідок цього не-ЛТР-профілі ліній чутливіші до локальних умов атмосфери (за умови рівності функції джерела функції Планка) і відображають стан порівняно глибших шарів. Зміщення глибин утворення ліній відносно їхніх рівноважних значень визначаються не-ЛТР-ефектами: у міжгранульних областях не-ЛТР-ефекти незначні, тому глибини утворення ліній майже не відрізняються, тоді як у гранулах рівні нейтрального заліза збіднені, внаслідок чого лінії утворюються глибше, ніж при ЛТР-наближенні. У випадку однорідної атмосфери також відбувається зміщення областей утворення ліній: фотосферні лінії — в глибші, хромосферні лінії — у вищі шари [9]. Згідно з табл. 2 сильна лінія λ 388.629 нм зміщується у глибші шари, тому що у моделях грануляції, які використовувались, відсутній температурний мінімум.

В умовах сонячної атмосфери залізо переважно іонізоване, а тому лінії Fe I дуже чутливі до температури: локальне збільшення температури викликає зменшення атомів Fe I і навпаки [9]. При нерівноважному утворенні лінії є чутливими ще й до грануляційного контрасту. Найбільший вплив дає поле УФ-випромінювання, яке визначається грануляційною структурою у глибоких шарах, звідки воно виходить і доносить контраст в області утворення ліній [12]. Заселеності рівнів Fe I визначаються фотоіонізаційними процесами. В той же час останні не впливають на функції джерела для переходів між верхніми рівнями, які в значній мірі зв'язані

сильними УФ-лініями. В області фотосфери ці лінії непрозорі і підтримують збудження близьким до теплового [12]. Таким чином, у фотосфері іонізаційна рівновага для нейтрального заліза суттєво відрізняється від рівноважної, а збудження ліній близьке до теплового. У випадку сонячної грануляції збудження слабких та помірної ліній, що розглядаються, в області їхнього утворення (табл. 2) також близьке до теплового. У верхніх шарах грануляції функції джерела ліній суттєво відрізняються від функції Планка ($S < B$), бо сильні лінії Fe I в цій області вже не є непрозорими.

В розглянутих неоднорідних моделях потоки, що піднімаються, у фотосфері стають холоднішими. Для цих потоків характерні різкі температурні градієнти, у міжгранульних областях температура змінюється порівняно плавно. В рівноважних умовах ці області були б збагачені атомами Fe I. Насправді вони додатково іонізуються випромінюванням яскравих областей, що знаходяться нижче. Як показують розрахунки, фотосферні шари над гранулами (яскраві області) іонізовані більше, ніж міжгранульні області. Внаслідок того яскраві області у верхніх шарах атмосфери будуть більш збіднені нейтральним залізом, ніж міжгранульні області; лінія утворюється у глибших шарах, діапазон температур утворення ліній стає вужчим (оскільки $S = B$). Отже, лінії над гранулами будуть менш глибокі і матимуть меншу еквівалентну ширину. Звичайно, це ж стосується і міжгранульних областей, але в меншій мірі, бо вони менш іонізовані. ЛТР-наближення дає протилежну картину — еквівалентна ширина над гранулою збільшується; лінія у гранулі утворюється в ширшому діапазоні температур, ніж лінія у темній області. Внаслідок цього лінії, що утворюються в яскравих областях, глибші.

Розглянемо просторові варіації вибраних нами ліній Fe I для двох типів моделей: квазістаціонарних однопотоків та повністю нестаціонарних багатопотоків.

На рис. 1 для слабкої лінії Fe I λ 670.357 нм показано просторові варіації інтенсивності в континуумі та еквівалентних ширин, залежність еквівалентної ширини від інтенсивності в неперервному спектрі в центрі диску Сонця в рамках однопоткової моделі грануляції в ЛТР-наближенні та з урахуванням відхилення від ЛТР. Інтенсивність нормована на середнє значення. Модель має стовпчасту структуру; відсутні вторинні конвективні потоки, інтенсивність в неперервному спектрі змінюється від +15 % до -25 % відносно середнього значення. Оскільки конвективні потоки носять ламінарний характер, флуктуації інтенсивності еквівалентної ширини незначні. Як видно з рисунка, в областях з підвищеною яскравістю еквівалентна ширина лінії дещо зменшується (не-ЛТР-розрахунок). В результаті залежність W від I_c послаблюється, кореляція між ними від'ємна: $r = -0.29$; ЛТР-розрахунок дає збільшення W в гранулі і додатну кореляцію: $r = 0.93$. Таким чином, не-ЛТР-кореляція між W та I_c є меншою і може стати від'ємною. При зменшенні вкладу фотоіонізаційних процесів кореляція спочатку послаблюється, а потім стає додатною.

Для слабких ліній інтенсивність континууму, що провічується в частотах лінії, дає вагомий вклад в інтенсивність лінії. Внаслідок цього осциляції W практично повністю повторюють хід зміни інтенсивності в континуумі. Це добре видно для ЛТР-залежності (рис 1, а), у випадку не-ЛТР сказане стосується високочастотних осциляцій. По мірі збільшення сили лінії вклад континуумів зменшується.

В області низьких інтенсивностей в континуумі $I_c < 0.82 I_{cp}$ (рис. 1, б) еквівалентні ширини збільшуються із зменшенням інтенсивності, причому це стосується обох (ЛТР та не-ЛТР) залежностей. Таке збільшення W викликано розширенням профілів нисхідними конвективними потоками.

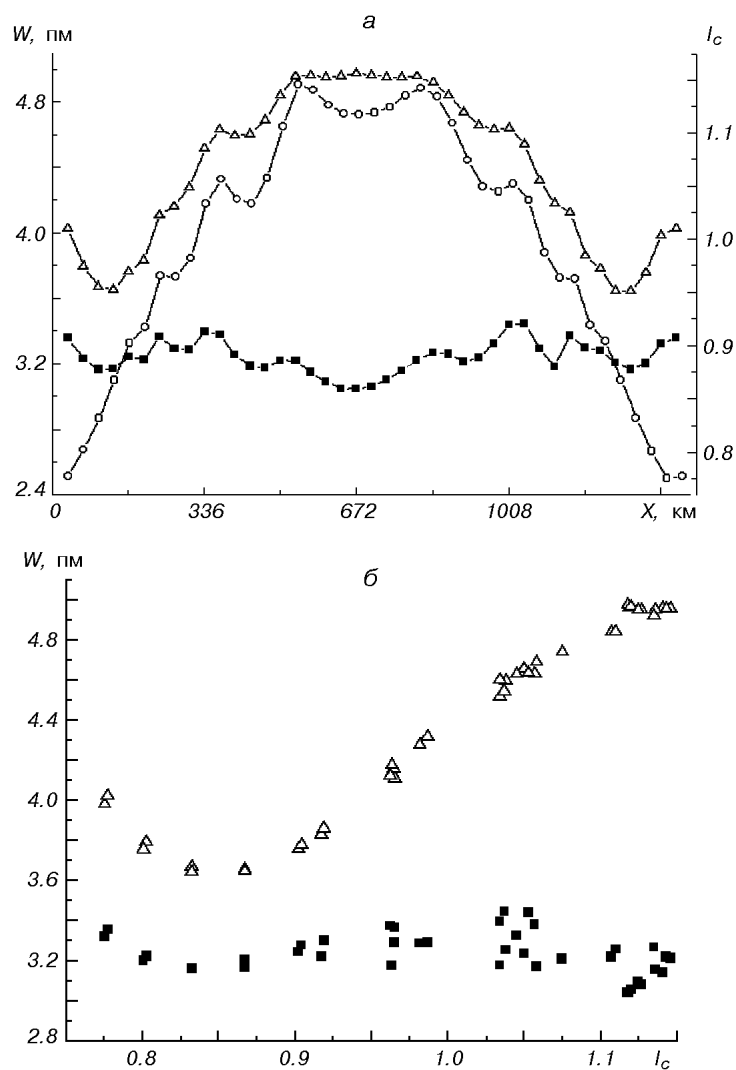


Рис. 1. Просторові варіації лінії λ 670.357 нм для квазістаціонарної моделі: *a* — варіації інтенсивності в неперервному спектрі (кружечки) та еквівалентних ширин (трикутники — ЛТР, квадратики — не-ЛТР), *б* — залежність еквівалентних ширин від інтенсивності в неперервному спектрі

Таблиця 3. Еквівалентні ширини (W , пм) ліній Fe I в гранулі і міжгранульній області при 1.5D та 2D перенесенні випромінювання (квазістаціонарна модель)

λ , нм	1.5D		2D	
	гранула	міжгранула	гранула	міжгранула
388.629	86.6	99.3	88.6	95.2
525.021	5.42	6.38	5.60	5.97
670.357	2.50	3.42	2.62	3.13
671.032	0.63	0.92	0.68	0.80

Для решти ліній залежності аналогічні, правда, для помірної лінії вплив не-ЛТР-ефектів менший.

Ми оцінили вплив горизонтальних ефектів на еквівалентні ширини ліній. В табл. 3 приведено еквівалентні ширини чотирьох ліній, що розглядаються, в центрі гранули і міжгранульній області при 1.5D- і

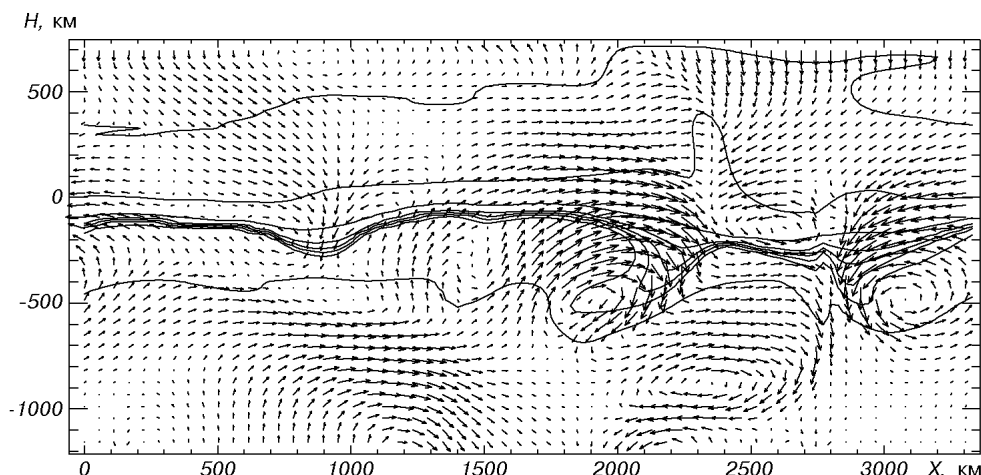


Рис. 2. Ізотерми та поле швидкостей для нестационарної моделі

2D-перенесенні випромінювання для однієї із квазістационарних моделей. Як бачимо, горизонтальні ефекти зменшують відмінність між еквівалентними ширинами: в гранулі еквівалентна ширина зростає, в міжгранульній області — зменшується при врахуванні горизонтального перенесення випромінювання. Отже, горизонтальні ефекти, як і ефекти відхилення від ЛТР, зменшують просторові варіації еквівалентних ширин; вплив їх на еквівалентні ширини при цьому менший, правда, вклад горизонтальних ефектів протилежний до не-ЛТР-ефектів. Як видно з табл. 3, найчутливішою до горизонтального перенесення є слабка лінія λ 671.03 нм, яка утворюється в найглибших шарах атмосфери. При зменшенні розмірів області моделювання, як показують розрахунки, різниця між еквівалентними ширинами зменшується (збільшується роль горизонтальних ефектів).

Зазначимо, що сильні лінії утворюються у верхніх шарах області моделювання. Крім того, в цих моделях немає температурного мінімуму, внаслідок чого представлені дані для лінії λ 388.629 нм не відображають вкладу ядра лінії.

Оскільки флуктуації інтенсивності незначні, ефектів просторового замивання для однопотоківих моделей ми не розглядали.

В рамках багатомасштабних моделей у фотосфері виникають горизонтальні потоки, які порушують стовпчасту структуру грануляції; конвекція трактується як нестационарна, тому топологія течій суттєво змінюється в часі. Ми ж розглядаємо, як зазначено вище, тільки один знімок часової послідовності таких моделей. Як показують розрахунки інших моделей даної серії, отримані результати так чи інакше стосуються решти моделей.

Для нестационарних моделей характерні помітні флуктуації параметрів моделі, що відображається на профілях ліній та їхніх параметрах. А тому ми враховували просторове замивання ліній, яке породжується функцією приладу.

Розподіл поля швидкостей та ізотерми (4000, 5000, 6000, 7000, 8000, 10000 і 12000 K) для моделі, що розглядається, показано на рис. 2. Варто звернути увагу на наявність двох температурних виступів (друга ізотерма зверху) в районі 2350 км та 2900 км, викликаних адиабатичним стисненням горизонтальними потоками, які далі рухаються вниз; між цими двома

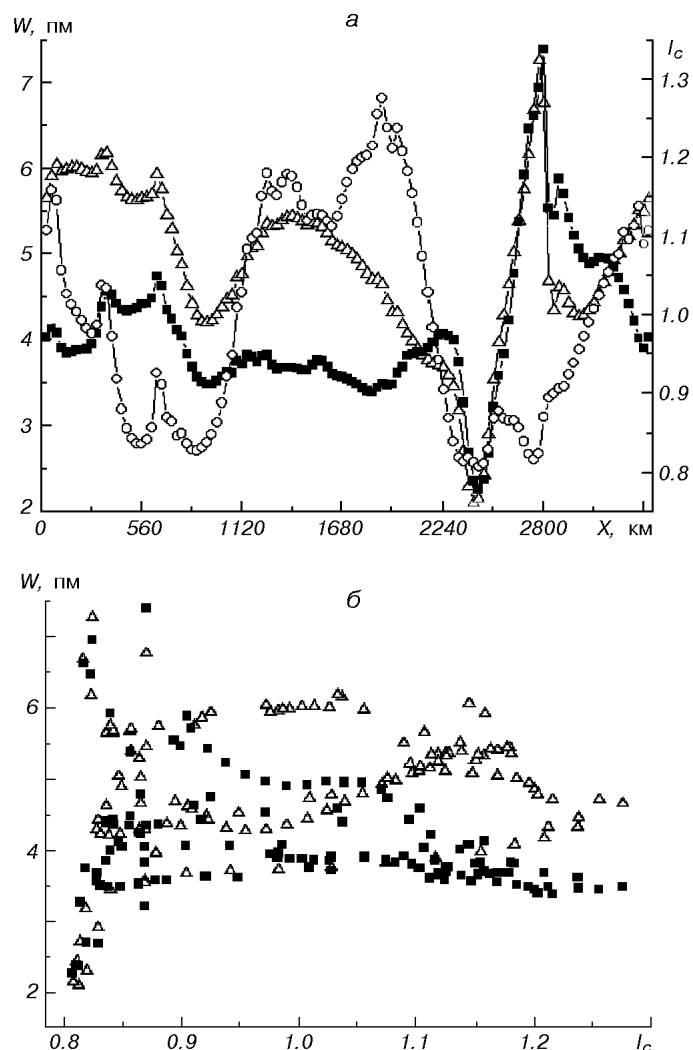


Рис. 3. Просторові варіації лінії λ 670.357 нм для нестационарної моделі: *a* — варіації інтенсивності в неперервному спектрі (кружечки) та еквівалентних ширин (трикутники — ЛТР, квадратики — не-ЛТР), *б* — залежність еквівалентних ширин від інтенсивності в неперервному спектрі, *в* — варіації інтенсивності в неперервному спектрі та еквівалентних ширин після просторового замивання, *г* — залежність еквівалентних ширин від інтенсивності в неперервному спектрі після просторового замивання

областями підвищеної температури є область з пониженою температурою (потoki рухаються в різні сторони, газ адіабатично розширюється).

Усереднені еквівалентні ширини ліній $\lambda\lambda$ 525.021, 670.357, 671.032 нм становлять відповідно 6.63, 4.07 та 1.28 пм для не-ЛТР-випадку і 7.72, 4.91, 1.96 пм для ЛТР (усереднювали інтенсивності, а потім знаходили середню еквівалентну ширину). Для того щоб говорити про збіг із спостережуваними значеннями, необхідно провести обчислення для достатнього числа моделей. Зазначимо лише, що для найслабшої лінії λ 671.032 нм з низьким потенціалом збудження нижнього рівня ($EPL = 1.49$ eV) різниця між ЛТР-та не-ЛТР-значеннями W найбільша, і це при тому, що лінія утворюється в найглибших шарах атмосфери. Така ж особливість утворення слабких ліній Fe I в умовах не-ЛТР була виявлена при дослідженні однорідних моделей атмосфери [9].

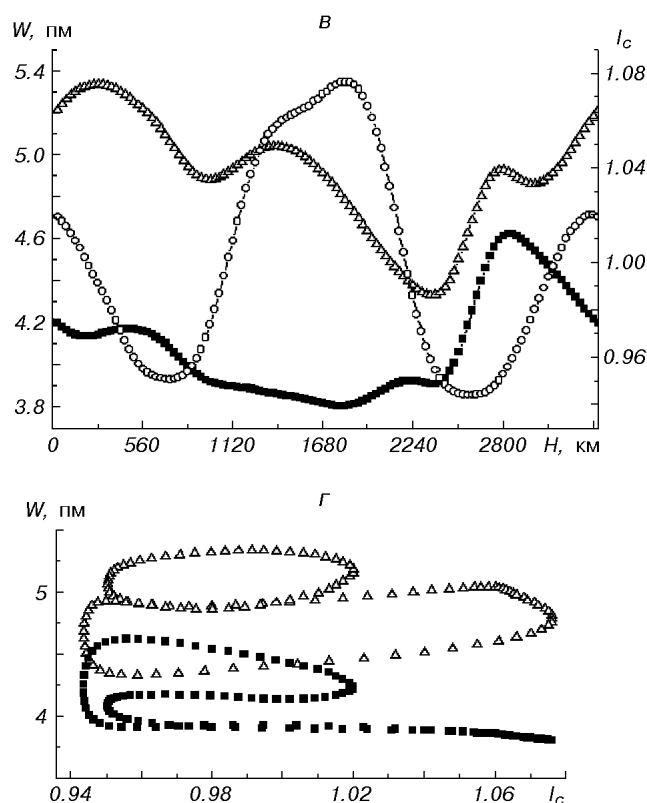


Рис. 3 (продовження)

На рис. 3 зображено просторові варіації інтенсивності в неперервному спектрі та еквівалентної ширини (ЛТР та не-ЛТР) лінії λ 670.357 нм, залежність W від I_c в центрі диска Сонця для нестаціонарної моделі як з урахуванням, так і без урахування ефектів просторового замивання профілів.

Для слабких ліній (як і в квазістаціонарних моделях) помітний вклад в еквівалентні ширини дає просвітлене випромінювання континууму (рис. 3, а). Як видно з рис. 3, б, в міжгранулах ЛТР та не-ЛТР-значення еквівалентних ширин слабо відрізняються, тоді як в області гранул не-ЛТР-ефекти суттєво зменшують еквівалентні ширини; картина аналогічна для сильної лінії, для помірної лінії вплив не-ЛТР-ефектів менший.

В області згаданих температурних виступів (міжгранульна область) число агентів селективного поглинання зменшується, зменшується також глибина утворення лінії і еквівалентна ширина (особливо в області першого виступу). Поряд з мінімумом еквівалентної ширини виникає різкий максимум, обумовлений конвективними рухами вниз на глибині утворення лінії (профілі ліній в цій області сильно розмиті). В області міжгранул, де мають місце сильні нисхідні зустрічні потоки, виникають потоки, що рухаються в протилежні сторони. Внаслідок розрідження температура спадає, ядро лінії утворюється у дещо вищих холодніших шарах, еквівалентна ширина лінії при цьому також підсилюється.

Згаданий мінімум з максимумом майже такі ж по величині для ЛТР-випадку (не-ЛТР-ефекти в цій області утворення лінії незначні).

Таблиця 4. Коефіцієнти кореляції між W та I_c

λ , нм	ЛТР		не-ЛТР	
	без замив.	замив.	без замив.	замив.
388.629	0.08	-0.06	-0.39	-0.53
525.021	0.22	0.07	0.01	-0.20
670.357	0.21	0.05	-0.26	-0.55
671.032	0.03	-0.13	-0.40	-0.65

Тобто, такі локальні зміни температури в міжгранульних областях, викликані горизонтальними потоками, та нисхідні потоки суттєво впливають на просторові варіації еквівалентних ширин. І це не може не відобразитись на коефіцієнті кореляції між W та I_c . При не-ЛТР-моделюванні внаслідок переіонізації еквівалентні ширини ліній Fe I послаблені, і вплив згаданого максимуму з мінімумом на кореляції значно більший, ніж при рівноважному утворенні ліній. Це ж в тій чи іншій мірі стосується помірної та сильної ліній.

Коефіцієнти кореляції між W та I_c для чотирьох ліній, які ми розглядаємо, представлені в табл. 4. Наявність вторинних рухів зменшує кореляцію між W та I_c ; для не-ЛТР-розрахунку переважає від'ємна, тоді як для ЛТР-профілів — додатна кореляція. Коефіцієнти кореляції для рівноважних W (без замивання) збільшуються від нижчого рівня фотосфери до висоти 290 км, а потім зменшуються, що вказує на вплив стохастичних рухів в області утворення ліній.

Ефекти відхилення від ЛТР по-різному впливають на еквівалентні ширини ліній [9]: для слабких та сильних ліній еквівалентні ширини зменшуються, помірні ж лінії менш чутливі до не-ЛТР-ефектів. В рамках досліджуваних моделей грануляції не-ЛТР-ефекти найбільше проявляються в області гранул і дають вагомий вклад в коефіцієнт кореляції між W та I_c .

На залежностях W від I_c в області низьких значень інтенсивності різко збільшується дисперсія W , причому точки з найбільшим відхиленням — це значення еквівалентних ширин в області вище згаданих екстремумів. Як бачимо, за рахунок вкладу цієї області коефіцієнт кореляції зменшується з додатного до нуля для ЛТР-наближення. При врахуванні не-ЛТР-ефектів, які підсилюють цю тенденцію для сильної та слабких ліній, збільшується від'ємна кореляція. Внаслідок цього не-ЛТР-коефіцієнти кореляції зменшуються з висотою (для помірної лінії кореляція між W та I_c практично відсутня), а потім збільшуються (для сильної лінії).

Просторове замивання зменшує амплітуду варіацій і може змінити їхній характер (рис. 3, в). Так, коефіцієнт кореляції для ЛТР-випадку зменшується, може стати навіть від'ємним, тоді як при не-ЛТР-дослідженні він переважно зростає по модулю в сторону від'ємних значень. Зауважимо, що до інтерпретації результатів згладжування потрібно підходити обережно. Справді, згідно з моделлю атмосфера має нескінченну періодичну структуру двох гранул (одна яскравіша, друга слабша) і двох міжгранул, зображених на рис. 2. Внаслідок періодичності структури атмосфери залежності $W = W(I)$ для обох гранул стають замкнутими (рис. 3, г). Тому моделювання замивання породжує участки кривої $W = W(I)$ для їхнього замикання, які дають хибний вклад у кореляцію. Для зменшення цього ефекту слід брати ширшу область моделювання, але обов'язково з більшим числом гранул.

Порівнюємо отримані нами результати з експериментальними. Спосте-

реження показують, що еквівалентні ширини ліній Fe I $\lambda\lambda$ 670.357, 671.032 нм практично не залежать від інтенсивності в континуумі [15]. Не-ЛТР-моделювання дає невеликий від'ємний нахил, тоді як ЛТР-дослідження — невеликий додатний нахил. В області низьких інтенсивностей за рахунок збільшення W (розширення профілів нисхідними потоками в міжгранульних областях) нахил залежності збільшується (при дослідженні великого числа моделей в області малих інтенсивностей виникає друга вітка з більшим нахилом). Це зв'язано з тим, що в 2D-моделях газові потоки фактично нескінченно протяжні в третьому вимірі, а це приводить до більшої взаємодії нисхідних потоків порівняно з 3D-моделями, внаслідок чого градієнти температур в області нисхідних потоків будуть різними, що і відображається на залежностях W від I_c . Кореляція між W та I_c для не-ЛТР-розрахунку при цьому збільшується. В одномасштабних 2D-моделях з ламінарними потоками горизонтальні потоки менш інтенсивні, а тому немає такого різкого збільшення еквівалентних ширин в міжгранульних областях; немає збільшення флуктуацій еквівалентних ширин при низьких інтенсивностях в континуумі і для експериментальних даних [14, 15].

ВИСНОВКИ

1. Просторові варіації еквівалентних ширин над гранульно-міжгранульними областями чутливі до не-ЛТР-ефектів; не-ЛТР-моделювання дає від'ємний нахил залежності W від I_c , тоді як ЛТР-розрахунок — додатний.

2. В 2D-моделях завищена взаємодія нисхідних потоків, що дає завищений (від'ємний) коефіцієнт кореляції між W та I_c при не-ЛТР-моделюванні.

3. В міжгранульних областях ЛТР- та не-ЛТР-значення W слабо відрізняються, тоді як в гранулі не-ЛТР-ефекти суттєво зменшують еквівалентні ширини ліній і згладжують їхні флуктуації.

4. Горизонтальні ефекти згладжують просторові варіації еквівалентних ширин ліній Fe I; вклад їх при цьому менший і протилежний до не-ЛТР-ефектів.

5. Збіднення рівнів Fe I УФ-випромінюванням приводить до зменшення інтервалу висот, на яких утворюються лінії, внаслідок чого при не-ЛТР еквівалентні ширини заборонених ліній чутливіші до локальних умов і відображають стан глибших шарів атмосфери.

Моделі сонячної грануляції у свій час надав нам О. С. Гадун, який всіляко підтримував цю роботу.

1. Бабий Б. Т., Стодилка М. И. Глубины образования интенсивности в D-линиях натрия в различных положениях на солнечном диске // Солн. данные.—1986.—№ 11.—С. 80—85.
2. Гадун А. С. Моделирование турбулентной конвекции в оболочке Солнца. — Киев, 1986—24 с.—(Препринт // АН УССР. Ин-т теор. физики; ИТФ-86106 Р).
3. Гадун А. С. Пространственные вариации резонансной линии лития 671 нм в двумерной искусственной грануляции // Кинематика и физика небес. тел.—1999.—13, № 2.—С. 153—159.
4. Гадун А. С., Ханслмайер А. Вариации асимметрии и параметров линий в гранульно-межгранульных областях двумерной искусственной грануляции // Кинематика и физика небес. тел.—1997.—13, № 3.—С. 24—48.
5. Гуртовенко Э. А., Костык Р. И. Фраунгоферов спектр и система солнечных сил осцилляторов. — Киев: Наук. думка, 1989.—198 с.
6. Стодилка М. И., Рикалюк Р. С. Задача двумерного переносу випромінювання для багаторівневих атомів // Журн. фіз. досліджень.—1998.—2, № 3.—С. 427—432.
7. Щукина Н. Г. Линии Fe I в спектрах холодных звезд: температурная диагностика атмосферы солнечного типа // Кинематика и физика небес. тел.—1998.—14, № 5.—С. 415—428.

8. Щукина Н. Г. Линии Fe I в спектрах холодных звезд: не-ЛТР-коррекция содержания железа на Солнце // Кинематика и физика небес. тел.—1999.—15, № 6.—С. 523—535.
9. Щукина Н. Г., Трухильо Буено Х. Линии Fe I в спектрах холодных звезд: не-ЛТР-эффекты в атмосферах солнечного типа // Кинематика и физика небес. тел.—1998.—14, № 4.—С. 315—329.
10. Athay R. G., Lites B. W. Fe I ionization and excitation equilibrium in the solar atmosphere // *Astrophys. J.*—1972.—176, N 3.—P. 809—831.
11. Auer L., Fabiani Bendicho P., Trujillo Bueno J. Multidimensional radiative transfer with multilevel atoms: I. ALI method with preconditioning of the rate equations // *Astron. and Astrophys.*—1994.—292, N 1.—P. 599—615.
12. Carlsson M., Rutten R. J., Bruls J. H. M. J., Shchukina N. G. The non-LTE formation of Li I lines in cool stars // *Astron. and Astrophys.*—1994.—288, N 3.—P. 860—882.
13. Gadun A. S., Solanki S. K., Johannesson A. Two-dimensional simulation of solar granulation: description of technique and comparison with observations // *Astron. and Astrophys.*—1999.—350, N 3.—P. 1018—1034.
14. Kiselman D. High-spatial-resolution solar observations of spectral lines used for abundance analysis // *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.*—1994.—104, N 1.—P. 23—77.
15. Kiselman D. The 671 nm Li I line in solar granulation // *Astron. and Astrophys.*—1998.—333, N 2.—P. 732—740.
16. Lites B. W. The solar neutral iron spectrum. II Profile synthesis of representative Fe I fraunhofer lines // *Solar Phys.*—1973.—32.—P. 283—306.
17. Nordlund Æ. A re-evolution of the granular ΔI_{rms} // *Small-Scale Dynamical Processes in Quiet Stellar Atmospheres. — Sunspot: Sac. Peak Observ.*, 1984.—P. 174—179.
18. Piskunov N. E., Kupka F., Ryabchikova T. A., et al. VALD: The Vienna Atomic Line Data Base // *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.*—1995.—112, N 3.—P. 525—535.
19. Shchukina N. G., Trujillo Bueno J., Kostik R. I. The NLTE Formation of Iron Lines Used in Solar Polarimetry // *Solar Phys.*—1997.—172, N 1.—P. 117—124.

Поступила в редакцию 07.08.00