

УДК 523.942

doi: <https://doi.org/10.15407/kfnt2020.01.003>**Н. Г. Щукіна^{1,2,3}, Р. І. Костик¹**¹ Головна астрономічна обсерваторія Національної академії наук України,
вул. Академіка Заболотного 27, Київ, Україна, 03143² Астрономічна обсерваторія Київського національного університету
ім. Тараса Шевченка, вул. Обсерваторна 3, Київ, Україна, 04053³ Астрономічна обсерваторія Львівського національного університету імені Івана Франка,
вул. Кирила і Мефодія 8, Львів, Україна, 79005
E-mail: shchukin@mao.kiev.ua, kostik@mao.kiev.ua

Діагностика поля швидкостей спокійного Сонця лямбда-метр-методом: лінія Si I 1082.7 нм

Досліджено можливості лямбда-метр-методу для дослідження поля швидкостей спокійного Сонця за допомогою лінії Si I 1082.7 нм. З цією метою проведено НЛТР-моделювання профілів інтенсивності даної лінії для центра сонячного диску в рамках тривимірної моделі, яка описує дрібномаштабну магнітну активність спокійної фотосфери. Поля швидкостей, відновлені з теоретичних НЛТР-профілів інтенсивності лінії Si I 1082.7 нм за допомогою лямбда-метр-методу, порівнювались з модельними. Розглянуто вплив на отримані результати атмосферних і інструментальних ефектів. Це атмосферна турбулентність та дифракція світла на апертурі телескопів типу VTT, GREGOR та EST/DKIST. Показано, що у випадку спостережень лінії Si I 1082.7 нм на телескопах великого діаметра, таких як GREGOR та EST/DKIST, з просторовою роздільною здатністю, значно кращою від $0.27''$, лямбда-метр-метод дає досить надійні значення поля швидкостей для нижньої та верхньої фотосфери Сонця. Для середньої фотосфери кореляція між реальними та відновленими лямбда-метр-методом швидкостями гірша, особливо при спостереженнях на телескопах з меншим діаметром, таких як VTT. При низькій просторовій роздільній здатності, що перевищує $2''$, інформацію про поле швидкості можна отримати тільки для самих верхніх шарів фотосфери. При цьому відновлені лямбда-метр-методом швидкості виявляються помітно меншими від реальних значень.

Ключові слова: Сонце, фотосфера, грануляція, перенос випромінювання у лініях, спектроскопія, магнітна гідродинаміка.

ВСТУП

Ближня інфрачервона (ІЧ) область сонячного спектру в околицях $\lambda = 10830$ нм особливо перспективна для вивчення фізичних властивостей сонячної атмосфери [29]. Ця область містить діагностично важливі лінії триплету He I 1083 нм і Si I 1082.7 нм. Триплет гелію містить інформацію про хромосферу [8], тоді як ядро лінії кремнію формується у фотосфері, поблизу температурного мінімуму [34].

Зазначені лінії мають досить велике значення фактора Ланде g_{ef} . Зокрема, для лінії Si I 1082.7 нм $g_{\text{ef}} = 1.5$, тоді як для ліній триплету He I 1082.909 , 1083.025 і 1083.034 значення g_{ef} дорівнюють 2.0 , 1.75 і 0.875 відповідно. Оскільки ці лінії розташовані в ІЧ-області спектру, їхня чутливість до ефекту Зеемана проявляється сильніше, ніж для ліній в оптичній частині спектру з тими ж або навіть вищими значеннями фактора Ланде [28]. З цієї причини ІЧ-лінії He I і Si I особливо цінні для одночасного вимірювання магнітних полів у різноманітних фотосферних і хромосферних структурах. На даний час опубліковано досить велику кількість робіт на цю тему. Їхній огляд можна знайти, наприклад, у роботах Хоменко і Койядоса [18], Лагг та ін. [27] і Щукіної і Трухільо Буено [35].

Інша область застосування триплету He I 1083 нм і Si I 1082.7 нм — вивчення динамічних процесів у фотосфері і хромосфері [11, 18]. Наприклад, у роботах [6, 7] досліджувалось поширення хвиль у фотосфері і хромосфері сонячної плями, а також у порах і факелах шляхом інверсії одночасних спектрополяриметричних спостережень зазначених ліній на німецькому баштовому телескопі VTT (о. Тенеріфе, Канарські острови). У роботі [5] розглядалось поширення біжучих хвиль у плямі і прилеглий до неї області на основі аналізу часової серії спектрополяриметричних спостережень на VTT триплету He I 1083 нм і Si I 1082.7 нм. У роботах [12, 13] використовувалися поляриметричні спостереження цих ліній для моделювання поширення магнітоакустичних хвиль у плямах. Інверсія одночасних спостережень триплету He I 1083 нм і Si I 1082.7 нм, виконана Кукейном та ін. [25], дозволила відновити поле швидкостей у фотосфері і хромосфері однієї з активних областей.

Наземні сонячні телескопи великого діаметра, оснащені ІЧ-спектрополяриметрами, відкривають нові можливості для використання спектральної області $\lambda = 1083$ нм з метою дослідження динамічної магнітної структури атмосфери Сонця. До них належить у першу чергу 4-м сонячний телескоп DKIST (Daniel K. Yorn Solar Telescope) [17, 42], введення в дію якого очікується вже до 2019 р., а також майбутній 4-м європейський сонячний телескоп EST (European Solar Telescope) [16, 30] з відповідними ІЧ-спектрополяриметрами. Слід згадати також успішно працюючий 1.5-м Європейський сонячний телескоп GREGOR [3, 11, 15, 38], обладнаний ІЧ-спектрографом GRIS [9]. Перераховані наземні засоби для сонячних ІЧ-спектрополяримет-

ричних спостережень вимагають подальшої розробки і вдосконалення методів діагностики сонячної атмосфери.

У даній роботі ми проаналізуємо діагностичний потенціал одного з таких методів — так званий лямбда-метр-метод (λ -m method), запропонований у 1987 р. Стеббінсом і Гуде [39] з метою визначення поля швидкостей в атмосфері Сонця з бісекторів профілів спектральних ліній. У наступні роки лямбда-метр-метод був успішно використаний рядом дослідників для інтерпретації спостережень сонячних ліній нейтрального заліза, хрому та іонізованого барію і заліза [19, 21, 22, 23, 24, 32].

Мета цієї роботи — оцінити, якою мірою поле швидкостей спокійного Сонця, відновлюване за допомогою цього методу з лінії Si I 1082.7 нм, близьке до реальних сонячних значень. Особливістю інтерпретації цієї лінії є необхідність враховувати ефекти відхилення від локальної термодинамічної рівноваги (т. зв. НЛТР) при її формуванні в атмосфері Сонця [4, 33, 34, 40, 41]. При цьому різниця між НЛТР- і ЛТР-профілями даної лінії помітно змінюється вздовж сонячної поверхні.

Крім того, необхідно брати до уваги, що на якість спостережень лінії Si I 1082.7 нм впливає астрономічна видимість (якість зображення, seeing), а також ряд інструментальних ефектів. До останніх ефектів слід віднести дифракцію світла на апертурі телескопа, що обмежує його роздільну здатність, кінцеву ширину інструментального профілю спектрографа, розсіяне світло, темновий струм і т. п.

Ідея нашого дослідження полягає у порівнянні поля швидкостей (т. зв. m -швидкостей), відновлених за допомогою лямбда-метр-методу з теоретичних НЛТР-профілів інтенсивності лінії Si I 1082.7 нм, з полем швидкостей тривимірної моделі атмосфери, яку ми використовували для розрахунку зазначених профілів. Ми розглянемо також вплив на отримані результати найбільш важливих атмосферних та інструментальних ефектів. Це — астрономічна видимість, що визначається локальною турбулентністю у земній атмосфері, і дифракція світла на апертурі телескопа.

ВХІДНІ ДАНІ І МЕТОД

Модель атмосфери Сонця. Предмет нашого дослідження — поле швидкостей у незбурених (спокійних) областях сонячної атмосфери. У зв'язку з цим при розрахунку профілів інтенсивності випромінювання лінії Si I 1082.7 нм ми використовували тривимірну (3D) модель магнітоконвекції Ремпеля [31] для одного моменту часу. Згідно з дослідженням дель Піно Алемана та ін. [10] дана модель добре описує дрібномасштабну магнітну активність і термодинамічну структуру спокійної фотосфери Сонця.

Обрана тривимірна модель має поверхневу середню напруженість магнітного поля близько 170 Гс. При цьому щільність вертикального

магнітного потоку (без знака) у видимих поверхневих шарах становить $B_z = 80$ Гс, а повний потік дорівнює нулю. Беручи до уваги, що область формування лінії Si I 1082.7 нм охоплює лише фотосферу і області температурного мінімуму, ми використовували самий верхній шар моделі висотою 0.8 Мм. Щоб зменшити обсяг обчислень при НЛТР-синтезі даної лінії, ми проінтерполювали вихідну 3D-модель на грубшу шкалу, що складається з $77 \times 77 \times 102$ точок. Це відповідає просторовому розділенню 80 км у горизонтальній площині, що описується координатами (ix, iy) , та 8 км у вертикальній (координата iz). Більш докладний опис використовуваної моделі, а також її порівняння з іншими магнітогідродинамічними (МГД) 3D-моделями можна знайти в роботах Щукіної, Сухорукова і Трухільо Буено [34, 36].

Синтез профілів інтенсивності лінії. Ми виконали НЛТР-моделювання профілів інтенсивності лінії Si I 1082.7 нм для центра сонячного диска у півторавимірному (т. зв. 1.5D) наближенні, тобто ми знехтували ефектами, що виникають при перенесенні випромінювання у горизонтальному напрямку. У цьому випадку використану тривимірну модель можна розглядати як набір з $77 \times 77 = 5929$ одновимірних моделей. У основі нашого НЛТР-моделювання лежить самоузгоджений розв'язок системи рівнянь переносу випромінювання та рівняння статистичної рівноваги для багаторівневої моделі атома Si I + Si II. Відзначимо, що всі розрахунки проводилися у наближенні повного перерозподілу випромінювання за частотами.

Чисельне рішення даної системи рівнянь було виконано за допомогою коду NATAJA, заснованого на ітеративному методі передкондиціонування Ауера та ін [2]. Більш детальний опис коду NATAJA, а також додаткові посилання з цього питання наведено у роботі Щукіної і Трухільо Буено [37]. Ми використовували досить просту модель атома кремнію, яка, як було показано в нашій роботі [34], добре описує фізику формування лінії Si I 1082.7 нм. Дана модель містить шістнадцять рівнів тонкої структури і шість радіативних зв'язано-зв'язаних переходів між ними. Кількість радіативних зв'язано-вільних переходів на родинні терми іона Si II дорівнює п'ятнадцяти. Додаткові відомості про моделі та атомних даних, включаючи сили осциляторів, поперечні перерізи фотоіонізації, дані про непружні зіткнення з електронами і т. п., наведено у тій же роботі [34].

Коефіцієнти відхилення від ЛТР-населеностей верхнього і нижнього рівнів лінії Si I 1082.7 нм, отримані в результаті самоузгодженого розв'язування системи рівнянь переносу випромінювання та рівняння статистичної рівноваги, потім використовувалися як вхідні параметри при формальному розв'язуванні рівняння переносу випромінювання в цій лінії за допомогою ітеративного методу DELOPAR, розробленого Трухільо Буено [43].

Ми розрахували профілі інтенсивності лінії Si I 1082.7 нм для кожного (ix, iy) вертикального стовпця тривимірної моделі магнітоконвекції зі спектральним розділенням 1 пм в інтервалі довжин хвиль

від -0.3 до 0.3 нм відносно центра лінії. Розрахунки проводилися зі значенням метеоритного вмісту кремнію на Сонці $A_{\text{Si}} = 7.55$. Ця величина добре узгоджується з оцінкою вмісту кремнію, отриманою нами в роботі [33] з допомогою НЛТР-синтезу спектральних ліній кремнію у рамках тривимірної гідродинамічної моделі сонячної фотосфери. Ми унормували профілі інтенсивності на просторово усереднену величину інтенсивності в континуумі I_C поблизу лінії Si I 1082.7 нм. Остання була отримана шляхом усереднення по всій горизонтальній поверхні моделі атмосфери.

Коефіцієнт поглинання в лініях Si I описувався фойгтівським профілем. Як основні механізми, що викликають розширення лінії Si I 1082.7 нм, було розглянуто загасання випромінювання і ван-дер-ваальсівська взаємодія з атомами водню. При розрахунку коефіцієнта поглинання в континуумі були враховані такі джерела непрозорості: зв'язано-вільне і вільно-вільне поглинання атомами водню (H^- і H I), зв'язано-вільне поглинання металами (C, Mg, Al, Si, Fe), вільно-вільне поглинання молекулами H_2 , релеївське розсіювання на атомах водню і томпсонівське розсіювання на електронах.

Більш детальну інформацію про спектральний НЛТР-синтез лінії Si I 1082.7 нм можна знайти в роботі [34].

Просторове згладжування. Оригінальні профілі інтенсивності лінії Si I 1082.7 нм, розраховані нами для тривимірної моделі магнітоконвекції Ремпеля [31], будемо вважати «ідеальними» спостереженнями. Насправді атмосферна турбулентність і ряд інструментальних ефектів призводять до погіршення якості спектральних спостережень на наземних телескопах. В нашій роботі ми виконали імітацію позаатмосферних і наземних спостережень лінії Si I 1082.7 нм на сонячних телескопах різного діаметра і при різному стані земної атмосфери, дотримуючись процедури, описаної в роботі Щукіної, Ольшевського та Хоменко [32].

Нагадаємо, що її суть полягає у фур'є-перетворенні вихідних двовимірних зображень інтенсивності, що відповідають одній довжині хвилі, за допомогою функції передачі модуляції (MTF). Зворотне перетворення Фур'є дає зображення, зареєстровані детектором, тобто «спостережувані» зображення, розмиті під дією локальної атмосферної турбулентності і дифракції світла на апертурі телескопа. Ми виконали цю процедуру для всього набору довжин хвиль лінії Si I 1082.7 нм за допомогою функції передачі модуляції, наведеною в роботі Фріда [14]. Зазначимо, що MTF-функція залежить від трьох параметрів [14, 20]: довжини хвилі, діаметра телескопа D і параметра Фріда R_0 . Останній параметр описує характерний розмір чарунок атмосферної турбулентності на даній довжині хвилі. У нашому дослідженні ми моделюємо «реальні спостереження» ІК-лінії кремнію на телескопах з діаметрами 0.7, 1.5 і 4.0 м для значень R_0 від 10 до 500 см. Вказані діаметри збігаються з діаметрами телескопів VTT (Vacuum Tower Telescope), GREGOR і EST (DKIST). Ми оцінюємо про-

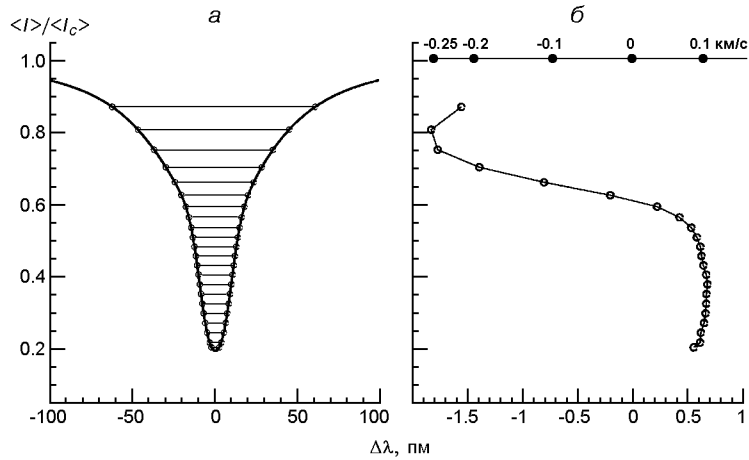


Рис. 1. Просторово усереднений НЛТР-профіль інтенсивності I лінії Si I 1082.7 нм, нормований на середню інтенсивність I_c в континуумі (а), і його бісектор (б) у 3D-моделі сонячної атмосфери [31]. Набір спектральних ширин w лінії представлено горизонтальними відрізками, що з'єднують ділянки рівної інтенсивності у синьому і червоному крилах профілю

сторове розділення «наземних спостережень» цієї лінії згідно з критерієм Релея:

$$206265 \lambda_{122} / R_0.$$

Лямбда-метр-метод. В основі лямбда-метр-методу [39] лежить так званий метод «зсуву бісектора» (bisector shift), запропонований у 1966 р. Куландером і Джеффісом [26] для визначення швидкостей в атмосфері Сонця із спостережуваних профілів спектральних ліній. Лямбда-метр-метод має справу з двома параметрами профілю лінії, а саме з бісектором і повною шириною w спектральної лінії (див. рис. 1).

Ми визначаємо бісектор $V(R)$ як геометричне місце середин хорд, що сполучають точки контуру спектральної лінії з однаковою залишковою інтенсивністю R [1]:

$$V(R) = (B + R) / 2,$$

де B і R — довжини хвиль відповідно синього і червоного крил лінії для заданого значення R , виміряні відносно центра лінії. Зазначимо, що $B < 0$ і $R > 0$. В цьому випадку повна ширина w лінії дорівнює

$$w = |B| + |R|.$$

Лямбда-метр-метод базується на припущенні, що досліджувана спектральна лінія формується в оптично тонкому шарі. Згідно із методом [39] зсув кожної точки бісектора, яка відповідає ділянці профілю лінії шириною w , є результатом доплерівського зсуву коефіцієнта поглинання лінії, викликаного нетепловою швидкістю у шарі, де ця

ділянка формується. При цьому у міру просування до більш глибоких ділянок профілю (а значить, до все менших ширин w) ми зміщуємося на все вищі шари атмосфери Сонця, що дає можливість відстежити зміну поля швидкостей з висотою.

При діагностиці лінії Si I 1082.7 нм лямбда-метр-методом ми взяли набір з двадцяти двох ширин w у діапазоні від 4.6 пм до 122.9 пм. Такі обмеження по ширині пов'язані з тим, що профілі цієї лінії у рамках тривимірної моделі магнітоконвекції Ремпеля [31] мають складну форму центральної частини. В результаті їхня ширина поблизу ядра лінії для деяких (ix, iy) -точок даної моделі ніколи не буває меншою за 4.6 пм. Натомість дуже плоскі далекі крила деяких профілів не дозволяють аналізувати швидкості на ширинах, що перевищують $w = 122.9$ пм.

Зазначимо, що ми модифікували стандартну процедуру [39] вимірювання лямбда-метр-швидкостей V_m . Більш докладний опис змін, внесених у цю процедуру, можна знайти в нашій роботі [32]. Суть модифікації зводиться до визначення швидкості для кожної (ix, iy) -координати просторової сітки моделі атмосфери (т. зв. карти швидкості) за доплерівським зміщенням не бісектора, а окремої ділянки у синьому крилі профілю інтенсивності лінії відносно ділянки з тією ж спектральною шириною, розташованої у синьому крилі просторово усередненого профілю. Дана ділянка належить одній із спектральних ширин w з описаного вище набору. Аналогічна процедура виконується для червоного крила лінії. Потім визначення швидкості повторюється для наступної ширини w .

Слід підкреслити, що лямбда-метр-метод дає інформацію лише про поле швидкостей, але не про висоти, яких ця інформація стосується. Отримати уявлення про ці висоти дозволяє наближення Еддінгтона — Барб'є, згідно з яким інтенсивність випромінювання спектральної лінії на довжині хвилі формується на геометричній висоті H , де оптична глибина $(\tau) = 1$ на цій довжині хвилі дорівнює одиниці. Виходячи із сказаного, ми будемо надалі порівнювати швидкості V_m , отримані для кожної ширини w профілю лінії Si I 1082.7 нм, зі значеннями моделі магнітоконвекції, що стосуються поверхні з постійною оптичною глибиною $(\tau) = 1$. При цьому через доплерівський зсув коефіцієнта поглинання висота H_B , де оптична глибина у синьому крилі профілю досягає одиниці, буде відрізнятися від значення $H_R = H[(\tau_R) = 1]$ у червоному крилі. Крім того, необхідно мати на увазі, що оскільки ми аналізуємо профілі, розраховані для центра сонячного диска, модельні швидкості презентують собою лише вертикальну складову V_z загального поля швидкостей.

Результати обчислення висот формування випромінювання у синьому і червоному крилах профілю лінії Si I 1082.7 нм для набору спектральних ширин w представлено на рис. 2. Як бачимо, для кожного фіксованого значення w висоти H_B і H_R змінюються у досить широкому діапазоні. Незважаючи на такий розкид, простежується

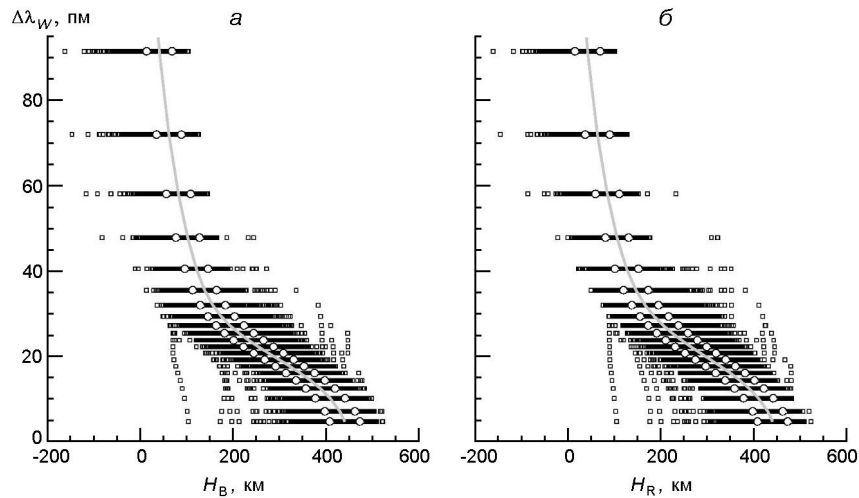


Рис. 2. Висоти формування випромінювання у синьому (а) і червоному (б) крилах профілю лінії Si I 1082.7 нм, розраховані для набору значень w . Квадратики — значення висоти для кожної з (ix, iy) -координат просторової сітки тривимірної моделі магнітоконвекції Ремпеля [31]. Суцільна лінія сірого кольору та білі кружечки — середня висота формування ділянки профілю із заданою шириною w та її стандартне відхилення відповідно

чітка залежність середньої висоти формування кожної ділянки профілю від величини w , що дає можливість відстежити, як у середньому змінюється поле нетеплових швидкостей з висотою в атмосфері Сонця. Наші розрахунки показують, що для лінії Si I 1082.7 нм інтервал висот, на яких можна спостерігати варіації швидкостей, що відповідають обраному діапазону ширин w , лежить у середньому між 20 і 440 км, тобто охоплює всю фотосферу аж до температурного мінімуму.

ПОРІВНЯННЯ ЛЯМБДА-МЕТР-ШВИДКОСТЕЙ З МОДЕЛЬНИМИ ШВИДКОСТЯМИ

«Ідеальні спостереження», які ми розглядаємо в даній роботі — це незгладжені теоретичні НЛТР-профілі лінії Si I 1082.7 нм, розраховані для просторової сітки тривимірної моделі атмосфери Сонця [31] без урахування інструментальних і атмосферних ефектів. Застосувавши лямбда-метр-метод до зазначених «ідеальних спостережень», ми розраховували карти V_m -швидкостей для всіх 22 спектральних ширин w профілю лінії кремнію і порівняли їх з картами модельних вертикальних швидкостей V_z , отриманими для поверхні з оптичною глибиною $(\tau_w) = 1$. На рис. 3 приведено коефіцієнти кореляції Пірсона $C(V_m; V_z)$ між картами швидкостей, отриманими за допомогою лямбда-метр-методу з незгладжених НЛТР-профілів лінії Si I 1082.7 нм, і картами модельних вертикальних швидкостей для різних значень ширини w . Видно, що для незгладжених профілів

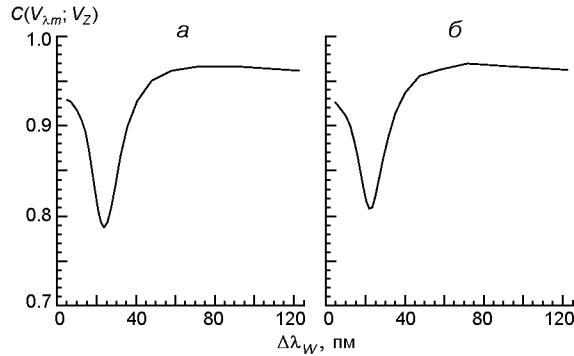


Рис. 3. Залежність від спектральної ширини лінії $\Delta\lambda_w$ значень коефіцієнта кореляції $C(V_{\lambda_m}; V_z)$ між картами лямбда-метр-швидкостей V_m , отриманими для випадку «ідеальних спостережень», і картами вертикальних швидкостей V_z з 3D-моделі [31]. Дані отримано для незгладжених НЛТР-профілів лінії Si I 1082.7 нм: *а* — для синього крила лінії, *б* — для червоного крила

лямбда-метр-швидкості, визначені як із синього, так і червоного крил цієї лінії, досить добре корелюють з відповідними вертикальними швидкостями. При цьому коефіцієнти кореляції досягають значень, що перевищують 0.9 при вимірюванні V_m -швидкостей поблизу центральної частини профілю ($\Delta\lambda_w = 10$ пм) і у зовнішніх крилах, починаючи з $\Delta\lambda_w = 35$ пм. Внутрішні крила поблизу $\Delta\lambda_w = 23.7$ пм дають менш надійні значення швидкостей. З рис. 3 видно, що коефіцієнти $C(V_{\lambda_m}; V_z)$ в цій частині профілю зменшуються до значень, близьких до 0.8. Цікаво, що у червоному крилі вони трохи вищі, ніж у синьому. Слід зазначити, що причина такої поведінки коефіцієнтів кореляції пов'язана скоріше всього з невиконанням умови оптично тонкого шару для внутрішніх крил лінії Si I 1082.7 нм.

Більш детальне уявлення про те, як виглядають швидкості, отримані з допомогою лямбда-метр-методу з незгладжених профілів лінії Si I 1082.7 нм, дає рис. 4. На ньому наведено діаграми розсіювання V_m -швидкостей, побудовані для трьох ділянок незгладжених профілів шириною $\Delta\lambda_w = 4.6, 23.7$ і 91.5 пм. Випромінювання у цих ділянках профілю формується відповідно у верхній, середній і нижній фотосфері. В цілому, як впливає з рис. 4, усереднені V_m -швидкості добре узгоджуються з модельними V_z -швидкостями. Однак також видно, що використання лямбда-метр-методу веде, як правило, до недооцінки реальних швидкостей, особливо в тих областях на поверхні Сонця, де вони досягають максимальних значень. При цьому найбільший розкид значень V_m -швидкості для кожного фіксованого значення швидкості з моделі спостерігається при визначенні лямбда-метр-швидкостей по внутрішніх крилах лінії Si I 1082.7 нм з шириною $\Delta\lambda_w$ близько 23.7 пм.

«Реальні спостереження» на 4-м телескопі, використані в нашій роботі для визначення V_m -швидкостей, — це теоретичні НЛТР-

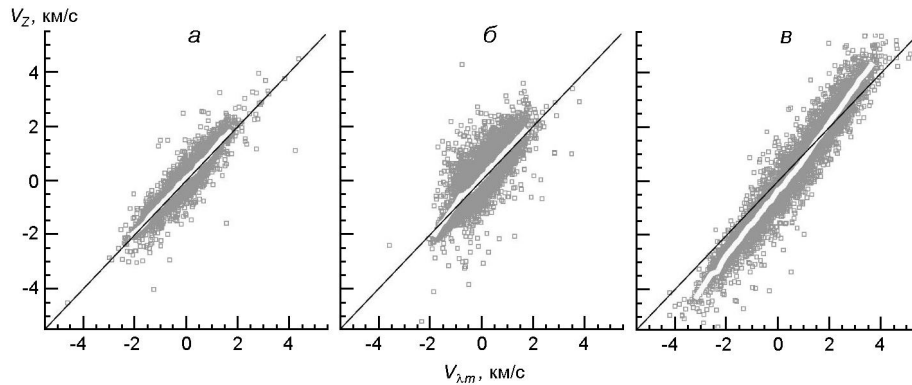


Рис. 4. Діаграми розсіювання лямбда-метр-швидкостей V_m (сірі точки), визначених з незгладжених НЛТР-профілів лінії Si I 1082.7 нм для трьох значень ширини лінії: *a* — $w = 4.6$ пм ($C(V_m; V_z) = 0.92$, $H = 442 \pm 32$ км), *б* — $w = 23.7$ пм ($C(V_m; V_z) = 0.78$, $H = 234 \pm 32$ км), *в* — $w = 91.5$ пм ($C(V_m; V_z) = 0.96$, $H = 41 \pm 27$ км). Швидкості (сірі квадратики) показано в залежності від вертикальних V_z -швидкостей тривимірної моделі атмосфери Сонця [31]. Біла крива — значення швидкостей, усереднених для кожних 100 точок поверхні. Показано дані для синього крила лінії

профілі лінії Si I 1082.7 нм для тривимірної моделі атмосфери Сонця [31], згладжені за допомогою описаної вище функції передачі модуляції (MTF). Для отримання такого роду спостережень ми врахували два ефекти: дифракцію світла на апертурі телескопа з діаметром 4 м, що веде до обмеження його роздільної здатності, і атмосферну турбулентність, яка впливає на просторове розділення спостережень. Дифракційна межа 4-м телескопа у ближній ІЧ-області спектру ($\lambda = 1083$ нм) становить 0.07". Це означає, що просторова роздільна здатність цього телескопа для значень параметра Фріда $R_0 \approx 4$ м визначається насамперед турбулентністю земної атмосфери. Виходячи із сказаного, ми вважатимемо профілі лінії Si I 1082.7 нм, згладжені для вказаних значень R_0 , «наземними спостереженнями». Навпаки, «спостереження» цієї лінії для значень $R_0 \approx 4$ м більшою мірою спотворені дифракцією на апертурі телескопа, а не атмосферною турбулентністю. З цієї причини профілі лінії Si I 1082.7 нм, розраховані для значень R_0 , більших, ніж діаметр 4-м телескопа, можна розглядати як отримані при «позаатмосферних спостереженнях». Їхнє просторове розділення визначається лише роздільною здатністю телескопа.

З рис. 5 видно, що отримати найкраще узгодження поля лямбда-метр-швидкостей з реальним полем швидкостей можна, якщо спостереження лінії Si I 1082.7 нм на 4-м телескопі будуть виконуватися за межами земної атмосфери. В цьому випадку значення коефіцієнтів кореляції $C(V_m; V_z)$ практично збігаються з коефіцієнтами для «ідеальних» спостережень. Найвище просторове розділення, якого було досягнуто при наземних спостереженнях у ближній ІЧ-області спектру поблизу $\lambda = 1083$ нм, становить 0.27" [15]. Цей випадок представ-

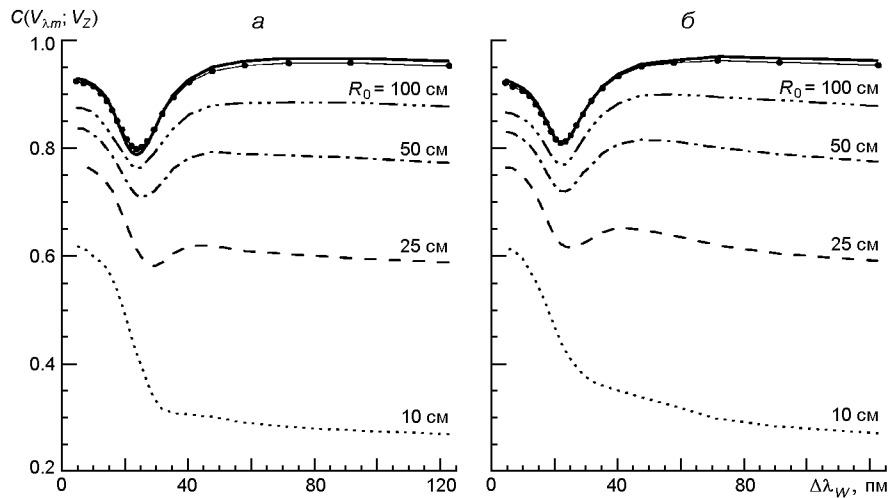


Рис. 5. Залежності від спектральної ширини лінії $\Delta\lambda_w$ значень коефіцієнта кореляції $C(V_{\lambda m}; V_Z)$ між картами лямбда-метр-швидкостей V_m , отриманими для випадку «реальних спостережень» лінії Si I 1082.7 нм на 4-м телескопі, і картами вертикальних швидкостей V_Z з 3D-моделі [31]: *a* — для синього крила лінії, *б* — для червоного крила, точки — для «позаатмосферних спостережень», що відповідають роздільній здатності 4-м телескопа. Пунктирні і штрих-пунктирні криві розраховано для випадку «наземних спостережень» лінії Si I 1082.7 нм, замитих через дифракцію світла на апертурі цього телескопа і атмосферну турбулентність. Числа біля кривих — значення параметрів Фріда. Суцільна крива — коефіцієнти кореляції для «ідеальних» спостережень

лено на рис. 5 кривою, що відповідає $R_0 = 100$ см. Видно, що при такому просторовому розділенні відновлені за допомогою лямбда-метр-методу швидкості досить близькі до реальних швидкостей. Свідченням цьому є високі коефіцієнти кореляції $C(V_m; V_Z)$, значення яких практично для всіх частин профілю лінії Si I 1082.7 нм перевищують 0.8.

На рис. 6 показано зміни лямбда-метр-швидкостей і вертикальних швидкостей уздовж одного з напрямків на поверхні тривимірної моделі атмосфери Сонця [31] при «наземних спостереженнях» з просторовим розділенням 0.27 . Як видно, V_m -швидкості добре відтворюють великомасштабні варіації поля нетеплових швидкостей по поверхні Сонця. Однак через замивання профілів ми недооцінюємо реальні швидкості, особливо у тих областях на поверхні Сонця, де вони особливо великі.

Рис. 6 демонструє, що погіршення астрономічної видимості, викликане зменшенням параметра Фріда (зменшенням характерного розміру чарунок турбулентності), призводить до зменшення коефіцієнтів кореляції для всіх частин профілю лінії Si I 1082.7 нм. Найвиразніше цей ефект проявляється у зовнішніх крилах, випромінювання яких виходить з нижніх шарів фотосфери. При просторовому розділенні 2.7 , що відповідає $R_0 = 10$ см, V_m -швидкості і модельні V_Z -швидкості для значень $\Delta\lambda_w > 40$ пм практично перестають корелю-

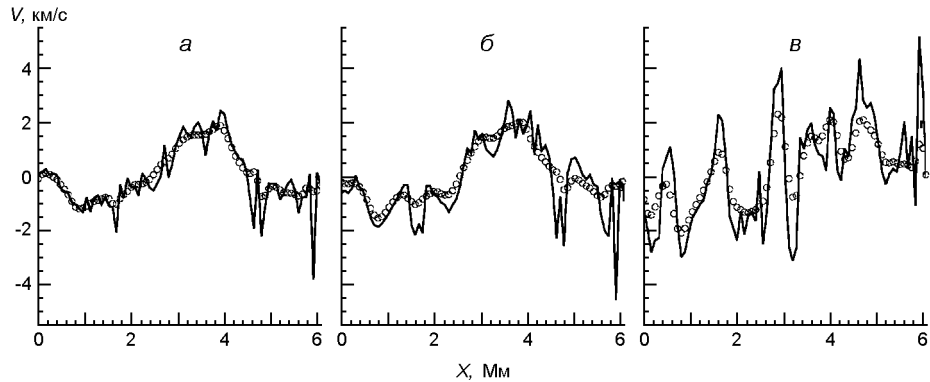


Рис 6. Варіації лямбда-метр-швидкостей V_m (кружечки) і вертикальних швидкостей V_z (суцільна крива) уздовж одного з напрямків (координата $iy = 7$) на поверхні 3D-моделі [31] для випадку «наземних спостережень» у синьому крилі лінії Si I 1082.7 нм з просторовим розділенням в 0.27 (параметр Фріда $R_0 = 100$ см). Показано дані для трьох ділянок згладжених профілів: *a* — центральна частина профілю ($w = 4.6$ пм), *b* — внутрішні крила ($w = 23.7$ пм), *v* — зовнішні крила ($w = 91.5$ пм). Діаметр телескопа — 4 м

вати. Отримати уявлення про поле швидкостей в атмосфері Сонця при такому просторовому розділенні можна, якщо для вимірювань лямбда-метр-швидкостей використовувати центральну частину (w

10 пм) профілю лінії Si I 1082.7 нм, випромінювання в якій формується у верхніх шарах фотосфери. Тут максимальні значення коефіцієнтів $C(V_m; V_z)$ близькі до 0.6.

«Реальні спостереження» на телескопах з діаметром 1.5 м і 0.7 м. Так само, як і у випадку 4-м телескопа, ми розділили профілі лінії Si I 1082.7 нм, отримані при «спостереженнях» на телескопах з діаметром до 1.5 м і 0.7 м, на два типи. До профілів першого типу належать «наземні спостереження». Для випадку телескопів з діаметрами 1.5 м і 0.7 м — це профілі, заміті у першу чергу атмосферною турбулентністю зі значеннями параметра Фріда $R_0 = 1.5$ м і $R_0 = 0.7$ м відповідно. При цьому вплив дифракції світла на апертурі даних телескопів виявляється слабкіше. Натомість просторове розділення профілів, що презентують «позаатмосферні спостереження», визначається роздільною здатністю телескопа. При спостереженнях у ближній ГЧ-області спектру на телескопі з діаметром 1.5 м вона дорівнює 0.18, а для телескопа діаметром 0.7 м — близько 0.39.

На рис. 7 показано, як змінюються значення коефіцієнтів кореляції $C(V_m; V_z)$ між картами V_m -швидкостей, визначених за допомогою лямбда-метр-методу з «реальних спостережень» лінії Si I 1082.7 нм на телескопах з діаметрами 4, 1.5 і 0.7 м, і картами модельних вертикальних швидкостей V_z , у залежності від значення параметра Фріда. Видно, що при погкій якості зображення, що відповідає просторовому розділенню гірше 1 ($R_0 = 25$ см) на довжині хвилі 1082.7 нм, немає значення, на телескопах якого діаметра ведуться спостереження. Для всіх трьох телескопів не дуже високі коефіцієнти, отримані

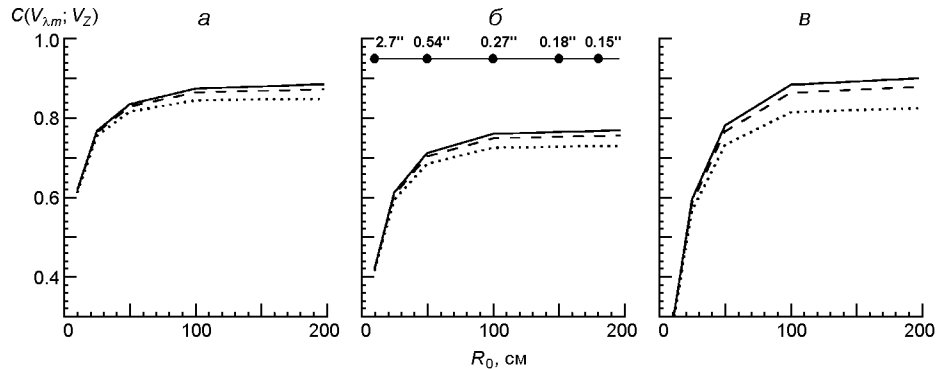


Рис. 7. Залежності від параметра Фріда R_0 значень коефіцієнтів кореляції $C(V_m; V_z)$ між картами лямбда-метр-швидкостей V_m , визначеними з «реальних спостережень» у синьому крилі лінії Si I 1082.7 нм, і картами вертикальних швидкостей з 3D-моделі [31]: *a* — центральна частина профілю ($r_w = 4.6$ пм), *б* — внутрішні крила ($r_w = 23.7$ пм), *в* — зовнішні крила ($r_w = 91.5$ пм). Суцільна, штрихова і пунктирна лінії — дані для спостережень на телескопах з діаметром 4 м, 1.5 м і 0.7 м відповідно. Верхня горизонтальна вісь — значення кутового просторового розділення на довжині хвилі 1082.7 нм, розраховані для значень параметра Фріда, представлених на нижній горизонтальній осі

при такому розділенні, виявляються однаковими. Із збільшенням просторового розділення коефіцієнт кореляції між картами V_m - і V_z -швидкостей спочатку збільшується, а потім залишається практично незмінним для всіх значень параметра Фріда, що перевищують апертуру розглянутого телескопа. Граничні значення коефіцієнтів $C(V_m; V_z)$ для «позаатмосферних спостережень» залежать від роздільної здатності телескопа. Дані рис. 7 показують, що при просторовому розділенні понад 0.27 ($R_0 > 100$ см) більш достовірні значення швидкостей лінії Si I 1082.7 нм можна отримати, якщо використовувати центральні частини профілю лінії і зовнішні крила. Тут коефіцієнти кореляції між картами V_m -швидкостей і картами V_z -швидкостей перевищують 0.8. Для спостережень на телескопі з діаметром 4 м вони стають ще вищими, наближаючись до 0.9. У внутрішніх частинах профілю (рис. 7б) кореляція виявляється помітно гірше (0.7...0.8).

ВИСНОВОК

У цій роботі ми досліджували область застосовності лямбда-метр-методу для вимірювання поля нетеплових швидкостей в атмосфері Сонця із спостережень спектральної лінії Si I 1082.7 нм. Основні результати дослідження такі.

Ми розрахували НЛТР-профілі інтенсивності даної лінії для центра сонячного диска у півторавимірному наближенні, використавши тривимірну модель магнітоконвекції Ремпеля [31] для одного моменту часу.

Ми промодельовали позаатмосферні і наземні спостереження лінії Si I 1082.7 нм на сонячних телескопах різного діаметра при різному стані земної атмосфери, розрахувавши спектральні зображення сонячної поверхні для всіх частотних точок профілю цієї лінії і згорнувши їх потім з функцією передачі модуляції.

Ми оцінили вплив на отримані результати найбільш важливих атмосферних та інструментальних ефектів. Це — атмосферна турбулентність і дифракція світла на апертурі телескопів типу VTT, GREGOR і EST/DKIST.

Ми показали, що лямбда-метр-швидкості, визначені з незгладжених профілів лінії Si I 1082.7 нм, добре корелюють з модельними швидкостями, визначеними на поверхні з одиничною оптичною глибиною. При цьому коефіцієнти кореляції між цими швидкостями у верхній і нижній фотосфері, отримані з вимірювань поблизу центральної частини профілю і у зовнішніх крилах, досягають значень, що перевищують 0.9. Внутрішні крила лінії, що формуються у середній фотосфері, дають менш надійні значення швидкостей.

Найкращого узгодження поля лямбда-метр-швидкостей з реальним полем швидкостей можна досягти, якщо провадити спостереження лінії Si I 1082.7 нм на телескопах великого діаметра типу GREGOR або EST/DKIST за межами земної атмосфери. У цьому випадку коефіцієнти кореляції практично збігаються з коефіцієнтами для незгладжених спостережень.

При найвищому просторовому розділенні в 0.27", досягнутому на сьогодні для наземних спостережень у ближній ІЧ-області сонячного спектру, лямбда-метр-метод дає досить надійні значення поле швидкостей для нижньої і верхньої фотосфери. У випадку 4-м телескопа типу EST/DKIST коефіцієнти кореляції між цими швидкостями для всіх частин профілю лінії Si I 1082.7 нм виявляються вищими за 0.8. Для середньої фотосфери кореляція між реальними і лямбда-метр-швидкостями виявляється гірше, якщо використовувати спостереження цієї лінії на телескопах меншого діаметра, таких як VTT.

При розділенні 0.27" лямбда-метр-швидкості добре відтворюють великомасштабні варіації поля нетеплових швидкостей по поверхні Сонця. Однак замивання профілів призводить до недооцінки реальних швидкостей, особливо там, де ці швидкості досягають пікових значень.

Погана астрономічна видимість, що відповідає просторовому розділенню понад 2.7", призводить до однакових і досить низьких коефіцієнтів кореляції між відновленими і реальними швидкостями незалежно від того, телескопи якого діаметра використовуються для ІЧ-спостережень. При спостереженні лінії Si I 1082.7 нм на телескопі з діаметром 0.7 м достовірні значення швидкостей при такому розділенні можна отримати тільки для найвищих шарів фотосфери. При цьому лямбда-метр-швидкості виявляються помітно меншими за реальні.

Ми плануємо застосувати результати даного дослідження для інтерпретації спектральних спостережень лінії Si I 1082.7 нм на телескопі GREGOR.

ФІНАНСУВАННЯ РОБОТИ

Робота фінансувалася у рамках планового фінансування установ Національної академії наук України.

1. Атрощенко И. Н., Гадун А. С., Гопасюк С. И., Гуртовенко Э. А., Кмито А. А., Кононович Э. В., Костык Р. И. и др. *Вариации глобальных характеристик Солнца*. Киев: Наук. Думка, 1991. 304 с.
2. 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. № 2. P. 599—615.
3. Balthasar H., Gömöry P., González Manrique S.J., Kuckein C., Kučera A., and 14 coauthors. *Spectropolarimetric observations of an arch filament system with GREGOR*. URL: <https://ui.adsabs.harvard.edu> — 2018. arXiv:1804.01789v1 [astro-ph.SR].
4. Bard S., Carlsson M. Constructing computationally tractable models of Si I for the 1082.7 nm transition. *Astrophys. J.* 2008. 682. № 2. P. 1376—1385.
5. Bloomfield D. Sh., Lagg A., Solanki S. K. The nature of running penumbral waves revealed. *Astrophys. J.* 2007. 671. № 1. P. 1005—1012.
6. Centeno R., Collados M., Trujillo Bueno J. Spectropolarimetric investigation of the propagation of magnetoacoustic waves and shock formation in sunspot atmospheres. *Astrophys. J.* 2006. 640. № 2. P. 1153—1162.
7. Centeno R., Collados M., Trujillo Bueno J. Wave propagation and shock formation in different magnetic structures. *Astrophys. J.* 2009. 692. № 2. P. 1211—1220.
8. Centeno R., Trujillo Bueno J., Uitenbroek H., Collados M. The influence of coronal EUV irradiance on the emission in the He I 10830 Å and D3 multiplets. *Astrophys. J.* 2008. 677. № 1. P. 742—750.
9. Collados M., López R., Páez E., Hernández E., Reyes M., and 11 more coauthors. GRIS: The GREGOR Infrared Spectrograph. *Astron. Nachr.* 2012. 333, Issue 9. P. 872—879.
10. del Pino Alemán, T., Stěpán J., Trujillo Bueno J., Shchukina N. A Novel investigation of the small-scale magnetic activity of the quiet Sun via the Hanle effect in the Sr I 4607 Å line. *Astrophys. J.* 2018. 863. № 2. P. 164—183.
11. Felipe T., Collados M., Khomenko E., Kuckein C., Asensio Ramos A., Balthasar H., Berkefeld T., Denker C., Feller A., Franz M., and 20 coauthors. Three-dimensional structure of a sunspot light bridge. *Astron. and Astrophys.* 2016. 596. № 1. P. A59—A71.
12. Felipe T., Khomenko E., Collados M. Magneto-acoustic waves in sunspots: first results from a new three-dimensional nonlinear magnetohydrodynamic code. *Astrophys. J.* 2010. 719. № 1. P. 357—377.
13. Felipe T., Khomenko E., Collados M., Beck C. Multi-layer study of wave propagation in sunspots. *Astrophys. J.* 2010. 722. № 1. P. 131—144.
14. Fried D. L. Optical resolution through a randomly inhomogeneous medium for very long and very short exposures. *J. Opt. Soc. Amer.* 1966. 56, Issue 10. P. 1372—1379.

15. Joshi J., Lagg A., Solanki S. K., Feller A., Collados M., Orozco Suárez D., Schlichenmaier R., Franz M., Balthasar H., Denker C., and 15 coauthors. Upper chromospheric magnetic field of a sunspot penumbra: observations of fine structure. *Astron. and Astrophys.* 2016. 596. № 1. P. A8—A15.
16. Jurčák J., Collados M., Leenaarts J., van Noort M., Schlichenmaier R. Recent advancements in the EST project. 2019, *Adv. Space Res.* 2019. 63, Issue 4. P. 1389—1395.
17. Keil S. L., Rimmele T. R., Wagner J., Elmore D., and ATST Team. ATST: the largest polarimeter. *Solar Polarization 6, ASP Conf. Ser.*, eds J. R. Kuhn, D. M. Harrington, H. Lin, S. V. Berdyugina, J. Trujillo-Bueno, S. L. Keil, T. Rimmele. 2011. 437. P. 319—328.
18. Khomenko E., Collados M. Oscillations and waves in sunspots. *Liv. Rev. Sol. Phys.* 2015. 12:6. P. 1—78.
19. Khomenko E. V., Kostik R. I., Shchukina N. G. Five-minute oscillations above granules and intergranular lanes. *Astron. and Astrophys.* 2001. 369. № 2. P. 660—671.
20. Korff D. Analysis of a method for obtaining near-diffraction-limited information in the presence of atmospheric turbulence. *J. Opt. Soc. Amer.* 1973. 63, Issue 8. P. 971—980.
21. Kostik R. I., Khomenko E. V. Observations of a bright plume in solar granulation. *Astron. and Astrophys.* 2007. 476. № 1. P. 341—347.
22. 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. № 3. P. 1405—1414.
23. Kostik R. I., Shchukina N. G. Fine structure of convective motions in the solar photosphere: observations and theory. *Astron. Rep. (Soviet Astron.)*. 2004. 48. № 9. P. 769—780.
24. 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, Issue 2. P. 261—275.
25. Kuckein C., Martínez Pille V., Centeno R. An active region filament studied simultaneously in the chromosphere and photosphere. II. Doppler velocities. *Astron. and Astrophys.* 2012. 542. P. A112—A125.
26. Kulander J. L., Jefferies J. T. Inference of velocities from line asymmetries. *Astrophys. J.* 1966. 146. P. 194—206.
27. Lagg A., Lites B., Harvey J., Gosain S., Centeno R. Measurements of photospheric and chromospheric magnetic fields. *Space Sci. Revs.* 2017. 210, Issue 1—4. P. 37—76.
28. Landi Degl'Innocenti E., Landolfi M. *Polarization in Spectral Lines*. — Dordrecht, Boston, London: Kluwer Academic Publishers, 2004.
29. Lites B. W., Keil S. L., Scharmer G. B., Wyller A. A. Steady flows in active regions observed with the He I 10830 Å line. *Solar Phys.* 1985. 97. № 1. P. 35—49.
30. Matthews S. A., Collados M., Mathioudakis M., Erdelyi R. The European Solar Telescope (EST). *SPIE Conf. Ser.* 2016. 9908. P. 990809—990817.
31. Rempel M. Numerical simulations of quiet Sun magnetism: On the contribution from a small-scale dynamo. *Astrophys. J.* 2014. 789. № 2. P. 131—153.
32. Shchukina N. G., Olshevsky V. L., Khomenko E. V. The solar BaII 4554 E line as a Doppler diagnostic: NLTE analysis in 3D hydrodynamical model. *Astron. and Astrophys.* 2009. 506. № 3. P. 1393—1404.
33. Shchukina N., Sukhorukov A., Trujillo Bueno J. Non-LTE determination of the silicon abundance using a three-dimensional hydrodynamical model of the solar photo-

- sphere. *Astrophys. J.* 2012. 755. № 2. P. 176—184.
34. Shchukina N., Sukhorukov A., Trujillo Bueno J. A Si I atomic model for NLTE spectropolarimetric diagnostics of the 10 827 Å line. *Astron. and Astrophys.* 2017. 603, № 2. P. A98—A113.
35. Shchukina N. G., Trujillo Bueno J. The diagnostic potential of the weak field approximation for investigating the quiet Sun magnetism: the Si I 10 827 Å line. *Astron. and Astrophys.* 2019. 628. A47. 12 p.
36. Shchukina N., Trujillo Bueno J. The impact of surface dynamo magnetic fields on the solar iron abundance. *Astron. and Astrophys.* 2015. 579. № 1. P. A112—A124.
37. Shchukina N., Trujillo Bueno J. The iron line formation problem in three-dimensional hydrodynamic models of solar-like photospheres. *Astrophys. J.* 2001. 550. № 2. P. 970—990.
38. Soltau D., Volkmer R., von der Lühe O., Berkefeld T. Optical design of the new solar telescope GREGOR. *Astron. Nachr.* 2012. 333, Issue 9. P. 847—853.
39. Stebbins R., Goode P. R. Waves in the solar photosphere. *Solar Phys.* 1987. 110. № 2. P. 237—253.
40. Sukhorukov A. V. Non-LTE formation of the Si I 1082.7 nm line in one- and three-dimensional models of the solar atmosphere. *J. Phys. Stud.* 2012. 16. № 1-2. P. 1903—1913.
41. Sukhorukov A. V., Shchukina N. G. NLTE formation of the solar silicon spectrum: silicon abundance in one-dimensional models of the solar atmosphere. *Kinematics Phys. Celestial Bodies.* 2012. 28. № 4. P. 169—182.
42. Triteschler A., Rimmele T. R., Berukoff S., Casini R., Kuhn J. R., Lin H., Rast M. P., McMullin J. P., Schmidt W., Wöger F., DKIST team. Daniel K. Inouye Solar Telescope: High-resolution observing of the dynamic Sun. *Astron. Nachr.* 2016. 337, Issue 10. P. 1064—1069.
43. Trujillo Bueno J. The generation and transfer of polarized radiation in stellar atmospheres. *Stellar Atmosphere Modeling, ASP Conf. Ser.*, eds I. Hubeny, D. Mihalas, K. Werner. 2003. 288. P. 551—582.

REFERENCES

1. Atroshchenko I. N., Gadun A. S., Gopasyuk S. I., Gurtovenko E. A., Kmito A. A., Kononovich E. V., Kostyk R. I., et al. (1991) Variations of global characteristics of the Sun. Kyiv: Naukova Dumka. (in Russian).
2. Auer L., Fabiani Bendicho P., Trujillo Bueno J. (1994) Multidimensional radiative transfer with multilevel atoms: I. ALI method with preconditioning of the rate equations. *Astron. and Astrophys.* 292(2). 599—615.
3. Balthasar H., Gömöry P., González Manrique S.J., Kuckein C., Kučera A., and 14 coauthors. (2018) *Spectropolarimetric observations of an arch filament system with GREGOR*. URL: <https://ui.adsabs.harvard.edu> — arXiv:1804.01789v1 [astro-ph.SR].
4. Bard S., Carlsson M. (2008) Constructing computationally tractable models of Si I for the 1082.7 nm transition. *Astrophys. J.* 682(2). 1376—1385.
5. Bloomfield D. Sh., Lagg A., Solanki S. K. (2007) The nature of running penumbral waves revealed. *Astrophys. J.* 671(1). 1005—1012.
6. Centeno R., Collados M., Trujillo Bueno J. (2006) Spectropolarimetric investigation of the propagation of magnetoacoustic waves and shock formation in sunspot atmospheres. *Astrophys. J.* 640(2). 1153—1162.

7. Centeno R., Collados M., Trujillo Bueno J. (2009) Wave propagation and shock formation in different magnetic structures. *Astrophys. J.* 692(2). 1211—1220.
8. Centeno R., Trujillo Bueno J., Uitenbroek H., Collados M. (2008) The influence of coronal EUV irradiance on the emission in the He I 10830 Å and D3 multiplets. *Astrophys. J.* 677(1). 742—750.
9. Collados M., López R., Páez E., Hernández E., Reyes M., and 11 more coauthors. (2012) GRIS: The GREGOR Infrared Spectrograph. *Astron. Nachr.* 333(9). 872—879.
10. del Pino Alemán, T., Stěpán J., Trujillo Bueno J., Shchukina N. (2018) A Novel investigation of the small-scale magnetic activity of the quiet Sun via the Hanle effect in the Sr I 4607 Å line. *Astrophys. J.* 863(2). 164—183.
11. Felipe T., Collados M., Khomenko E., Kuckein C., Asensio Ramos A., Balthasar H., Berkefeld T., Denker C., Feller A., Franz M., and 20 coauthors. (2016) Three-dimensional structure of a sunspot light bridge. *Astron. and Astrophys.* 596(1). A59—A71.
12. Felipe T., Khomenko E., Collados M. (2010) Magneto-acoustic waves in sunspots: first results from a new three-dimensional nonlinear magnetohydrodynamic code. *Astrophys. J.* 719(1). 357—377.
13. Felipe T., Khomenko E., Collados M., Beck C. (2010) Multi-layer study of wave propagation in sunspots. *Astrophys. J.* 722(1). 131—144.
14. Fried D. L. (1966) Optical resolution through a randomly inhomogeneous medium for very long and very short exposures. *J. Opt. Soc. Amer.* 56(10). 1372—1379.
15. Joshi J., Lagg A., Solanki S.K., Feller A., Collados M., Orozco Suárez D., Schlichenmaier R., Franz M., Balthasar H., Denker C., and 15 coauthors. (2016) Upper chromospheric magnetic field of a sunspot penumbra: observations of fine structure. *Astron. and Astrophys.* 596(1). A8—A15.
16. Jurčák J., Collados M., Leenaarts J., van Noort M., Schlichenmaier R. (2019) Recent advancements in the EST project. 2019, *Adv. Space Res.* 63(4). 1389—1395.
17. Keil S. L., Rimmele T. R., Wagner J., Elmore D., and ATST Team. (2011) ATST: the largest polarimeter. *Solar Polarization 6, ASP Conf. Ser.*, eds J. R. Kuhn, D. M. Harrington, H. Lin, S. V. Berdyugina, J. Trujillo-Bueno, S. L. Keil, T. Rimmele. 437. 319—328.
18. Khomenko E., Collados M. (2015) Oscillations and waves in sunspots. *Liv. Rev. Sol. Phys.* 12(6). 1—78.
19. Khomenko E. V., Kostik R. I., Shchukina N. G. (2001) Five-minute oscillations above granules and intergranular lanes. *Astron. and Astrophys.* 369(2). 660—671.
20. Korff D. (1973) Analysis of a method for obtaining near-diffraction-limited information in the presence of atmospheric turbulence. *J. Opt. Soc. Amer.* 63(8). 971—980.
21. Kostik R. I., Khomenko E. V. (2007) Observations of a bright plume in solar granulation. *Astron. and Astrophys.* 476(1). 341—347.
22. Kostik R., Khomenko E., Shchukina N. (2009) Solar granulation from photosphere to low chromosphere observed in Ba II 4554 Å line. *Astron. and Astrophys.* 506(3). 1405—1414.
23. Kostyk R. I., Shchukina N. G. (2004) Fine structure of convective motions in the solar photosphere: observations and theory. *Astron. Rep. (Soviet Astron.)*. 48(9). 769—780.
24. Koza J. (2010) Sensitivity of selected Ba II, Fe I, Fe II, and Cr I spectral lines to velocity in quiet solar atmosphere. *Solar Phys.* 266(2). 261—275.
25. Kuckein C., Martínez Pille V., Centeno R. (2012) An active region filament studied simultaneously in the chromosphere and photosphere. II. Doppler velocities. *Astron.*

- and *Astrophys.* 542. A112—A125.
26. Kulander J. L., Jefferies J. T. (1966) Inference of velocities from line asymmetries. *Astrophys. J.* 146. 194—206.
 27. Lagg A., Lites B., Harvey J., Gosain S., Centeno R. (2017) Measurements of photospheric and chromospheric magnetic fields. *Space Sci. Revs.* 210(1-4). 37—76.
 28. Landi Degl'Innocenti E., Landolfi M. (2004) *Polarization in Spectral Lines*. — Dordrecht, Boston, London: Kluwer Academic Publishers.
 29. Lites B. W., Keil S. L., Scharmer G. B., Wyller A. A. (1985) Steady flows in active regions observed with the He I 10830 Å line. *Solar Phys.* 97(1). 35—49.
 30. Matthews S. A., Collados M., Mathioudakis M., Erdelyi R. (2016) The European Solar Telescope (EST). *SPIE Conf. Ser.* 9908. 990809—990817.
 31. Rempel M. (2014) Numerical simulations of quiet Sun magnetism: On the contribution from a small-scale dynamo. *Astrophys. J.* 789(2). 131—153.
 32. Shchukina N. G., Olshevsky V. L., Khomenko E. V. (2009) The solar BaII 4554 E line as a Doppler diagnostic: NLTE analysis in 3D hydrodynamical model. *Astron. and Astrophys.* 506(3). 1393—1404.
 33. Shchukina N., Sukhorukov A., Trujillo Bueno J. (2012) Non-LTE determination of the silicon abundance using a three-dimensional hydrodynamical model of the solar photosphere. *Astrophys. J.* 755(2). 176—184.
 34. Shchukina N., Sukhorukov A., Trujillo Bueno J. (2017) A Si I atomic model for NLTE spectropolarimetric diagnostics of the 10 827 Å line. *Astron. and Astrophys.* 603(2). A98—A113.
 35. Shchukina N. G., Trujillo Bueno J. (2019) The diagnostic potential of the weak field approximation for investigating the quiet Sun magnetism: the Si I 10 827 Å line. *Astron. and Astrophys.* 628. A47.
 36. Shchukina N., Trujillo Bueno J. (2015) The impact of surface dynamo magnetic fields on the solar iron abundance. *Astron. and Astrophys.* 579(1). A112—A124.
 37. Shchukina N., Trujillo Bueno J. (2001) The iron line formation problem in three-dimensional hydrodynamic models of solar-like photospheres. *Astrophys. J.* 550(2). 970—990.
 38. Soltau D., Volkmer R., von der Lühe O., Berkefeld T. (2012) Optical design of the new solar telescope GREGOR. *Astron. Nachr.* 333(9). 847—853.
 39. Stebbins R., Goode P. R. (1987) Waves in the solar photosphere. *Solar Phys.* 110(2). 237—253.
 40. Sukhorukov A. V. (2012) Non-LTE formation of the Si I 1082.7 nm line in one- and three-dimensional models of the solar atmosphere. *J. Phys. Stud.* 16(1-2). 1903—1913.
 41. Sukhorukov A. V., Shchukina N. G. (2012) NLTE formation of the solar silicon spectrum: silicon abundance in one-dimensional models of the solar atmosphere. *Kinematics Phys. Celestial Bodies.* 28(4). 169—182.
 42. Tritschler A., Rimmele T. R., Berukoff S., Casini R., Kuhn J. R., Lin H., Rast M. P., McMullin J. P., Schmidt W., Wöger F., DKIST team. (2016) Daniel K. Inouye Solar Telescope: High-resolution observing of the dynamic Sun. *Astron. Nachr.* 337(10). 1064—1069.
 43. Trujillo Bueno J. (2003) The generation and transfer of polarized radiation in stellar atmospheres. *Stellar Atmosphere Modeling, ASP Conf. Ser.*, eds I. Hubeny, D. Mihalas, K. Werner. 288. 551—582.

Н. Г. Щукина^{1,2,3}, *Р. І. Костык*¹

¹Главная астрономическая обсерватория Национальной академии наук Украины, Киев, Украина

²Астрономическая обсерватория Киевского национального университета им. Тараса Шевченко, Киев, Украина

³Астрономическая обсерватория Львовского национального университета им. Ивана Франко, Львов, Украина

ДИАГНОСТИКА ПОЛЯ СКОРОСТЕЙ СПОКОЙНОГО СОЛНЦА ЛЯМБДА-МЕТР-МЕТОДОМ: ЛИНИЯ Si I 1082.7 НМ

Исследованы возможности лямбда-метр-метода для определения поля скоростей спокойного Солнца из спектральной линии Si I 1082.7 нм. С этой целью выполнено НЛТР-моделирование профилей интенсивности данной линии для центра солнечного диска с использованием трехмерной модели, описывающей мелкомасштабную магнитную активность спокойной фотосферы. Проведено сравнение поля скоростей, восстановленных с помощью лямбда-метр-метода из теоретических НЛТР-профилей интенсивности линии Si I 1082.7 нм, с полем скоростей из указанной модели атмосферы. Рассмотрено влияние на полученные результаты атмосферных и инструментальных эффектов. Это атмосферная турбулентность и дифракция света на апертуре телескопов, подобных VTT, GREGOR и EST/DKIST. Показано, что в случае наблюдений линии Si I 1082.7 нм на телескопах большого диаметра типа GREGOR и EST/DKIST с пространственным разрешением, существенно лучшем 0.27", лямбда-метр-метод дает достаточно надежные значения поля скоростей для нижней и верхней фотосферы Солнца. Для средней фотосферы корреляция между реальными и лямбда-метр-скоростями хуже, особенно при наблюдениях на телескопах меньшего диаметра, таких как VTT. При низком пространственном разрешении, превышающем 2", информация о поле скоростей может быть получена только для самых верхних слоев фотосферы. При этом лямбда-метр-скорости оказываются заметно меньше реальных значений.

Ключевые слова: Солнце, фотосфера, грануляция, перенос излучения в линиях, спектроскопия, магнитная гидродинамика.

N. G. Shehukina^{1,2,3}, *R. I. Kostyk*¹

¹Main Astronomical Observatory of National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

²Astronomical Observatory, Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

³Astronomical Observatory of Ivan Franko National University, Lviv, Ukraine

DIAGNOSTICS OF THE VELOCITY FIELD OF THE QUIET SUN USING THE LAMBDA-METER METHOD: THE Si I 1082.7 NM LINE

The validity of the lambda-meter method for determining the quiet Sun velocity field using the Si I 1082.7 nm line is investigated. To this end, the intensity profiles of this line were calculated for the solar disk center by means of NLTE radiative transfer calculations in a three-dimensional snapshot model atmosphere taken from a magneto-convection simulation of the small-scale magnetic activity in the quiet solar photosphere. Theoretical NLTE profiles of the Si I 1082.7 nm line were degraded because of the Earth's atmospheric turbulence and light diffraction by apertures of the telescopes like VTT, GREGOR, and EST/DKIST. The velocity field, retrieved from spatially unsmearred profiles and the profiles smearred to the resolution of ground-based observations, was compared with the ve-

locity field of the given snapshot model atmosphere. It is shown that in the case of observations of the Si I 1082.7 nm line on large-diameter telescopes like GREGOR and EST/DKIST with a spatial resolution substantially better than 0.27 arcsec, the lambda-meter method provides reliable values of the velocity field for the lower and upper solar photosphere. For the middle photosphere correlation between the inferred and the real velocities is worse particularly when using the smaller diameter telescopes similar to VTT. At a poor spatial resolution, exceeding 2 arcsec, information about the velocity field can be obtained only for the uppermost photospheric layers. For this case, the lambda-meter velocities turn out to be noticeably smaller than the real ones.

Keywords: Sun: photosphere — Sun: granulation — line: formation — techniques: spectroscopic — magnetohydrodynamics — radiative transfer.

Стаття надійшла до редакції 27.06.2019

Після доопрацювання 27.06.2019

Прийнята до друку 11.10.2019