

doi: <https://doi.org/10.15407/kfnt2019.06.018>

УДК 523.942

М. І. Стоділка¹, А. І. Присяжний¹, Р. І. Костик²

¹Астрономічна обсерваторія Львівського національного університету імені Івана Франка,
вул. Кирила і Мефодія 8, м. Львів, Україна, 79005
myroslav.stodilka@lnu.edu.ua, andrij13p@gmail.com

²Головна астрономічна обсерваторія Національної академії наук України,
вул. Академіка Заболотного, 27, м. Київ, Україна, 03143
kostik@mao.kiev.ua

Особливості конвекції в атмосферних шарах сонячного факела

За даними комплексних 2D-спостережень сонячного факела на телескопі VTT шляхом розв'язання оберненої задачі переносу випромінювання в лінії $Va\ II$ 455.4 нм отримано 3D-модель сонячної атмосфери в області факельної площадки. Оцінювання магнітного поля здійснено за V-профілями Стокса лінії $Fe\ I$ 1564.8 нм. Досліджено вплив магнітного поля на фотосферну конвекцію: розглянуто просторові варіації температури і швидкостей на різних висотах. Виявлено прояви локального магнітного динамо у фотосферних шарах сонячного факела: у шарах середньої фотосфери відбувається взаємне перетворення механічної і теплової енергії сонячної плазми у енергію магнітного поля. Інтегральний вплив дрібномасштабного магнітного динамо зводиться до зменшення температури і уповільнення руху переважajúчого низхідного потоку в шарах середньої фотосфери в областях факела з сильним полем (> 1 кГс), тоді як в областях факела зі слабким полем (< 1 кГс) відбувається підвищення температури і прискорення руху переважajúчого висхідного потоку в шарах середньої фотосфери. Показано, що магнітне поле факела стабілізує фотосферну конвекцію, а дрібномасштабне магнітне динамо зумовлює у фотосферних шарах факела подвійну температурну інверсію.

Ключові слова: Сонце, фотосфера, факели, діагностика, магнітне динамо.

ВСТУП

Для активних областей на диску Сонця у видимому діапазоні характерні такі утворення із сильними магнітними полями: плями, пори та факели. Факели спостерігають у крилах сильних хромосферних ліній, їх також видно в неперервному спектрі. Факели — найбільш помітні після плям структури на сонячному диску. Контраст факелів збільшується від центра до краю сонячного диска. Факели здебільшого розташовані поблизу активних областей чи їхніх залишків. Факели є скупченнями ізольованих яскравих точок у темних міжгранульних проміжках, а також крупніших утворень — факельних гранул. Для факелів характерне підвищення яскравості в ядрах хромосферних ліній, тобто хромосфера факелів значно гарячіша, ніж шари незбуреної атмосфери на тому ж рівні [24].

Факели спочатку були відкриті на лімбі сонячного диску у білому світлі, при цьому було виявлено зв'язок між факельними площадками і сильними магнітними полями [11]. Згідно з даними [14] збільшення яскравості факелів зумовлене наявністю яскравих магнітних трубок. Більш повні дані про природу факелів було отримано при аналізі результатів спостережень на КА «Hinode» [10] — показано, що факельні площадки — це скупчення магнітних концентрацій, які розширюються у верхніх шарах, утворюючи канопі зі слабшими похилими полями. При цьому фізичні умови у магнітних концентраціях узгоджуються з моделлю тонкої трубки.

Але є інша точка зору на природу факелів. Так, уявлення про факели як про сукупність магнітних трубок були поставлені під сумнів у роботі Р. І. Костика [3]. Виявляється, контраст у міжгранульних шарах в континуумі для факелів не залежить від магнітного поля, а отже, навряд чи факели є скупченням магнітних трубок (з полем порядку 1 кГс). Найімовірніше, підвищення яскравості факелів зумовлене зменшенням непрозорості плазми, внаслідок чого стають видимими гарячі стінки гранул.

Дослідженню фізичних властивостей факелів, процесів, які протікають у них, присвячено цикл робіт Костика та Хоменко [2, 3, 15, 16], де на основі комплексних двовимірних спостережень в лініях Ba II 455.403 нм і Fe I 1565 нм досліджувався вплив магнітного поля на конвекцію в області факела. Було показано, що магнітне поле по-різному впливає на конвективні рухи. Зокрема, у нижній фотосфері магнітне поле пригнічує конвекцію, тоді як у верхній фотосфері ніби стабілізує її та забезпечує більш ефективний перенос енергії; при цьому конвективні потоки досягають у факельних площадках більших висот. Також досліджено властивості акустичних хвиль у фотосферних та хромосферних шарах факела.

У роботі [25] досліджувались варіації характеристик факелів вздовж сонячного диска. Подібне дослідження, але на основі МГД-моделювання, було зроблено в роботі [17]: показано, що контраст факелів

лів залежить від положення на диску Сонця, довжини хвилі та магнітного поля.

У результаті побудови 3D-МГД-моделей було показано, що 3D-модель факела складається з двох компонентів — атмосфери всередині магнітної трубки та атмосфери поза нею [18] і що 3D-МГД-моделювання відтворює спостережувані дрібномасштабні особливості факелів [14]; у роботі [17] на основі 3D-МГД-моделей факела розраховано спектр контрасту факелів. В роботах [10, 12, 24] шляхом інверсії даних спостережень отримано напівемпіричні моделі факелів.

Відомо, що площа, покрита сонячними факелами, змінюється з циклом сонячної активності і корелює з кількістю плям [9]. А тому вважається, що магнітні поля факелів продукуються глобальним динамо. Водночас спостереження виявляють всюдишчі дрібномасштабні турбулентні магнітні поля, які не змінюються з сонячним циклом [9]. В роботі [19] було висунуто гіпотезу, що ці поля можуть бути згенеровані дрібномасштабним динамо (таке магнітне поле на малих масштабах має хаотичну полярність, а на великих масштабах його середнє значення стає близьким до нуля), тоді як глобальне магнітне поле зумовлене великомасштабним динамо (ВМД). Дрібномасштабне динамо (ДМД) діє в умовах сонячної конвекції. ДМД є одним із правдоподібних механізмів виникнення міжсіткових і турбулентних магнітних полів, а також може впливати на дію ВМД. Незважаючи на те, що ДМД є набагато ефективнішим механізмом перетворення кінетичної енергії у магнітну порівняно з ВМД [13], питання про роль ДМД при генерації сіткових магнітних полів та полів факелів досі залишається відкритим [9].

Наша робота присвячена дослідженню особливостей фотосферної конвекції на грануляційних масштабах в області факельної площадки і процесам взаємного перетворення кінетичної і внутрішньої енергії конвективних потоків у енергію магнітного поля і навпаки, що свідчить про дію дрібномасштабного динамо у фотосферних шарах атмосфери Сонця.

Для дослідження ми вибрали слабо блендовану лінію іонізованого барію 455.403 нм. Для цієї лінії характерна висока чутливість до фізичних параметрів сонячної атмосфери — від верхньої фотосфери до нижньої хромосфери, включно з областю температурного мінімуму. Через велику атомну масу барію ця спектральна лінія більш чутлива до швидкостей конвективних і хвильових рухів, ніж до теплових швидкостей.

У роботі [7] представлено результати дослідження діагностичних можливостей лінії $\text{Ba II } 455.403$ нм в обернених задачах переносу випромінювання. Враховуючи високий діагностичний потенціал вибраної спектральної лінії, ми застосували інверсний підхід для відтворення фізичних умов у шарах факельної площадки — побудови 3D-моделі з подальшим аналізом процесів, які протікають у замагніченій сонячній плазмі. Наскільки нам відомо, такий підхід до аналізу спостережень факела в лінії $\text{Ba II } 455.403$ нм досі не застосовувався.

СПОСТЕРЕЖНІ ДАНІ ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

В даному дослідженні ми використали дані комплексних спостережень факельної площадки в центрі диску Сонця: 1) спектрополяриметричні спостереження в ГЧ-лінії заліза Fe I 1564.8 нм з використанням приладу TIR (роздільна здатність: часова — 410 с, спектральна — 1.473 пм; просторова — 0.185); 2) вузькосмугові фільтрові спостереження в 37 довжинах хвиль лінії іонізованого барію Ba II 455.403 нм на приладі TESOS (роздільна здатність: часова — 25.6 с; спектральна — 1.6 пм; просторова — 0.089). Фактичне просторове розділення, зумовлене нестабільністю земної атмосфери, становило 0.4...0.7 .

Для дослідження ми вибрали область факела з найбільшим магнітним полем розміром 8.9×1.3 , якій відповідає площадка 100×15 пкл. Спектрополяриметричні та фільтрові дані були ототожені методом псевдоконтинууму [15].

Розв'язок оберненої задачі переносу випромінювання. Моделі спостережуваної факельної площадки були отримані шляхом розв'язування оберненої задачі переносу випромінювання. Так як обернена задача переносу некоректна, ми для забезпечення гладкості розв'язків та їхньої стійкості до початкових значень застосували тихоновські стабілізатори. Такий підхід зводиться до модифікації цільової функції [8]:

$$\| \mathbf{S}(\mathbf{x}) \|_{reg}^2$$

де стандартна цільова функція $\| \mathbf{S}(\mathbf{x}) \|^2$ характеризує близькість теоретичного профілю, отриманого в рамках моделі атмосфери (яка ітераційно уточнюється) до спостережуваного профілю вибраної лінії, λ — параметр регуляризації, $S(x)$ — тихонівський стабілізатор, \mathbf{x} — вектор, який описує стратифікації обезрозмірених параметрів моделі. Параметр регуляризації визначався на тестовій задачі з умови найкращого відтворення параметрів моделі.

Поправки до поточних значень параметрів моделі шукали із умови мінімуму для цільової функції

$$\mathbf{x} = \mathbf{x}_0 - \frac{\mathbf{D}(\mathbf{x}_0)^{-1} \mathbf{H}(\mathbf{x}_0)}{\mathbf{D}(\mathbf{x}_0)^{-1} \mathbf{H}(\mathbf{x}_0)}$$

Тут \mathbf{D} — матриця Гессе, \mathbf{H} — матричне представлення стабілізатора, \mathbf{x}_0 — вектор параметрів моделі на попередній ітерації.

За початкове наближення параметрів моделі використовувались параметри моделі атмосфери спокійного Сонця [26].

Модель атома барію. Модель атома барію ми запозичили з роботи [4] та доповнили новими даними для сил осциляторів з бази даних VALD [<http://vald.astro.uu.se>].

Для розрахунку профілю поглинання лінії Ba II 455.403 нм необхідно врахувати надтонку структуру та ізотопічний зсув [4, 20—23].

Резонансна лінія Ва II 455.403 нм має складну структуру. Так, барій має сім стабільних ізотопів (база даних атомних спектрів NIST <http://www.nist.gov/pml/data/asd.cfm>). Серед цих ізотопів тільки два (Ba^{135} , Ba^{137}) мають відмінний від нуля спіні ядра, що призводить до розщеплення нижнього та верхнього рівнів переходу, внаслідок чого лінія для кожного з цих двох ізотопів розділена на шість компонентів. Таким чином, лінія Ва II 455.403 нм із врахуванням надтонкої структури та ізотопічних зсувів складається із 17 складових [4]. Слабкі бленди, які лежать в крилах лінії, ми не враховували.

ОТРИМАНІ РЕЗУЛЬТАТИ

Для дослідження впливу магнітного поля на фізичні властивості сонячної плазми, на фотосферну конвекцію необхідно знати просторовий розподіл цього поля. Оскільки ІЧ-лінія Fe I 1564.8 нм утворюється у відносно вузькому діапазоні висот, то відтворене магнітне поле будемо прив'язувати лише до висоти утворення близьких крил лінії, тобто до висоти порядку 10 км. Іншими словами, надалі йтиметься про магнітне поле в нижніх шарах нижньої фотосфери. Для визначення магнітного поля ми використали запропонований нами в роботі [6] підхід до визначення напруженості магнітного поля за V-профілями Стокса. Зазначений метод дає тільки значення напруженості магнітного поля. Враховуючи результати відтворення вектора магнітного поля за тими ж даними спостережень [15], будемо вважати, що магнітне поле напрямлене вздовж нормалі до поверхні. Отриманий розподіл магнітного поля по поверхні вибраної площадки показано на рис. 1а. Як бачимо, найсильніші магнітні поля локалізуються у центральній частині площадки, а у верхній і нижній частинах площадки магнітне поле суттєво послаблене. При дослідженні впливу магнітного поля на фізичні властивості плазми в області факела ми розбили досліджувану область на 10 підплощадок з розміром 15 10 пкл, і у межах кожної підплощадки усереднювали отримані величини. Такий підхід зменшує модуляцію грануляційною структурою отриманих нижче залежностей параметрів плазми від магнітного поля. На рис. 1б показано розподіл вздовж факельної площадки магнітного поля, усередненого у таких підплощадках.

3D-модель факела. Модель факела будемо представляти сукупністю 1500 (100 15) одновимірних моделей. Для кожного пікселя ми розв'язали обернену багаторівневу задачу нерівноважного переносу випромінювання в лінії барію Ва II 455.403 нм. Ефектами горизонтального переносу випромінювання ми нехтували. Всі 1D-моделі пов'язані між собою спільною шкалою геометричних глибин, оскільки в нашому підході на нижній границі виконується горизонтальний баланс повного тиску. Таким чином, 3D-модель — це набір кубів даних таких параметрів: температура, швидкість, мікротурбулентна (нероз-

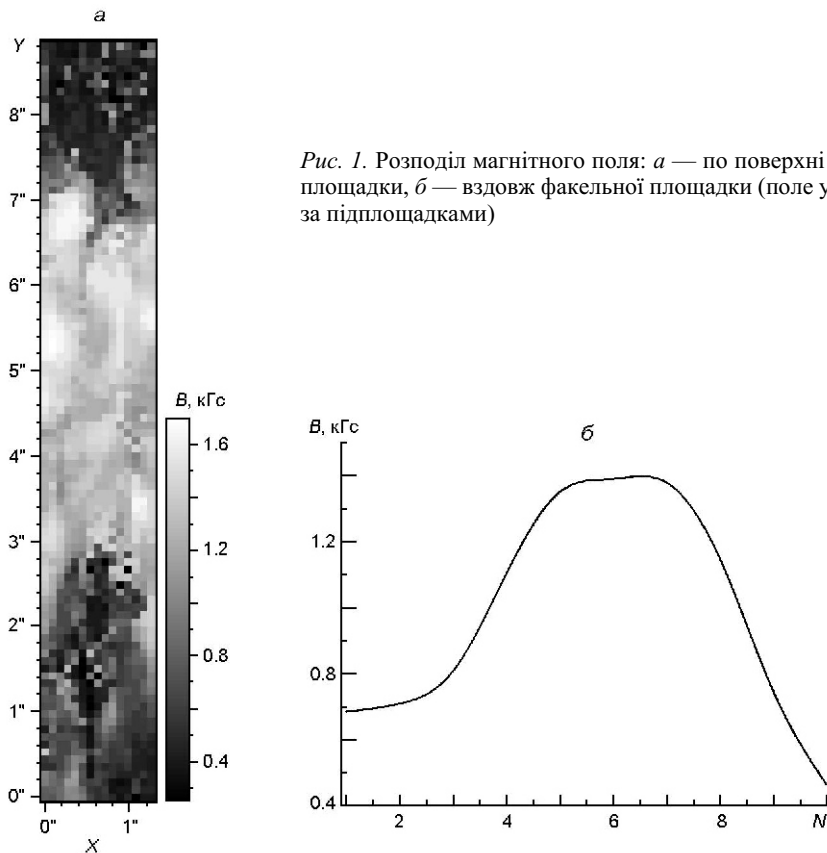


Рис. 1. Розподіл магнітного поля: *a* — по поверхні факельної площадки, *б* — вздовж факельної площадки (поле усереднене за підплощадками)

ділена) швидкість, газовий тиск, електронний тиск та магнітна індукція (відома тільки в нижніх шарах). Для прикладу, на рис. 2 та 3 показано розподіл варіацій температури та z -проекції швидкості по поверхні факела на різних висотах атмосфери Сонця. Для висхідних потоків (світлі тони) проекція швидкості додатна, для низхідних (темні тони) — від'ємна.

Розподіли цих двох параметрів показано лише для чотирьох характерних висот — 0, 200, 400 та 600 км. В шарах від 100 км до 350 км характерна наявність додаткового дрібномасштабного компонента для температурних варіацій. Його видно для висоти $h = 200$ км на рис. 2. У верхніх шарах атмосфери (вище 400 км) має місце укрупнення масштабів температурної структури грануляції. В умовах замагніченої плазми факела також проявляється інверсія температурних варіацій, але на відміну від спокійної атмосфери [1] область температурної інверсії проявляється у значно ширшому інтервалі висот.

На відміну від спокійної фотосфери [1], для факельної площадки швидкості руху речовини не проявляють монотонного зменшення з висотою (це видно, зокрема, з висотної залежності верхньої та нижньої межі для проекції швидкості). Так, на висотах $h = 200 \dots 400$ км швидкості низхідних потоків занижені порівняно із швидкостями у вищих шарах, а швидкості висхідних потоків у цих шарах дещо зави-

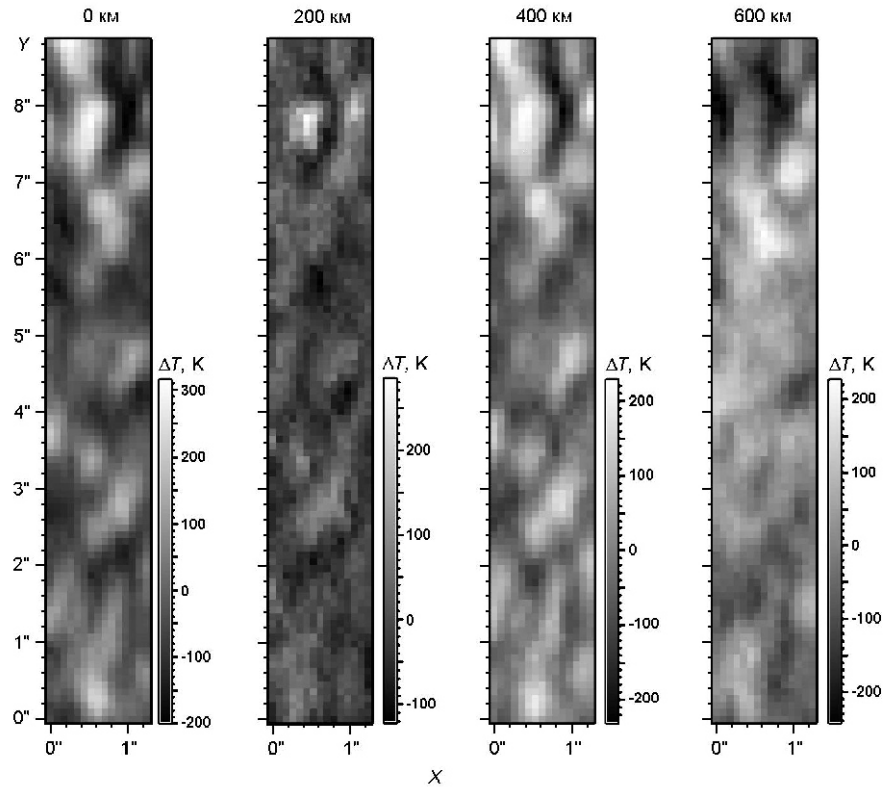


Рис. 2. Розподіл варіацій температури по поверхні факельної площадки

щені відносно швидкостей у вищих шарах. Як видно з рис. 3, структура просторових варіацій швидкості не зазнає з висотою суттєвих змін.

Особливості конвекції у фотосферних шарах факела. Зробимо більш детальний аналіз висотної залежності температурних варіацій та швидкостей для факельної площадки. На рис. 4 показано стратифікацію цих двох параметрів окремо для висхідних та низхідних потоків. Слабкі потоки, швидкість яких на нижній границі менша за 0.4 км/с, ми не розглядали. Стратифікації обох параметрів для потоків факельної площадки навіть якісно не подібні до аналогічних висотних залежностей для спокійної атмосфери [1].

Як бачимо, при русі плазми вгору (висхідні потоки в гранулах) в шарах $h = 200 \dots 400$ км швидкість руху речовини, на відміну від шарів незбуреної атмосфери, збільшується (рис. 4а). На цих же висотах збільшуються (у бік додатних значень) температурні варіації, що призводить до виникнення другої температурної інверсії (рис. 4б). Аналогічна особливість виникає при русі речовини вниз (низхідні потоки у міжгранулах). Справді, при русі вниз на висотах $h = 200 \dots 500$ км низхідні потоки суттєво сповільнюються (рис. 4в), а температура на тих же висотах $h = 300 \dots 500$ км зменшується (на 100 К, рис. 4г). Отже, в атмосферних шарах факела чітко проявляються дві області темпера-

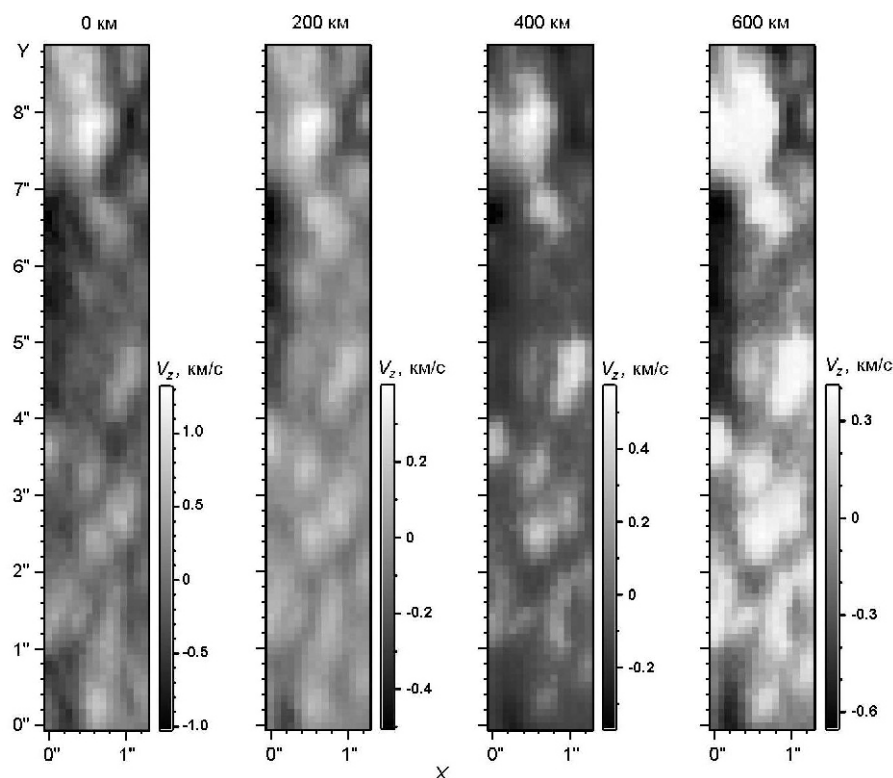


Рис. 3. Розподіл z -проекції швидкості по поверхні факельної площадки. Для висхідних потоків (світлі тони) z -проекція швидкості додатна, для низхідних потоків (темні тони) — від'ємна

турної інверсії: перша область — верхні шари нижньої та нижні шари середньої фотосфери, друга — шари верхньої фотосфери та нижньої хромосфери. Між цими двома областями інверсії є область, де структура температурних варіацій нижньої фотосфери ніби відновлюється. Чіткі межі областей інверсії окреслено нижче за результатами кореляційного аналізу.

Зазначимо, що у фотосферних шарах спокійної атмосфери має місце тільки одна область інверсії як для висхідних, так і для низхідних потоків, та зазначені вище особливості у стратифікаціях швидкостей не проявляються [1].

На нашу думку, такі особливості стратифікації параметрів атмосфери для сонячного факела зумовлені, найімовірніше, взаємним перетворенням енергії магнітного поля у кінетичну і внутрішню енергію замагніченої плазми та навпаки. Справді, при русі речовини вгору має місце перетворення енергії магнітного поля в кінетичну та внутрішню енергію плазми, за рахунок чого температура і швидкість руху речовини збільшуються. При русі вниз перетворення енергії відбувається у зворотному напрямку. При цьому на відповідних висотах низхідні потоки сповільнюються, а температура потоків зменшується.

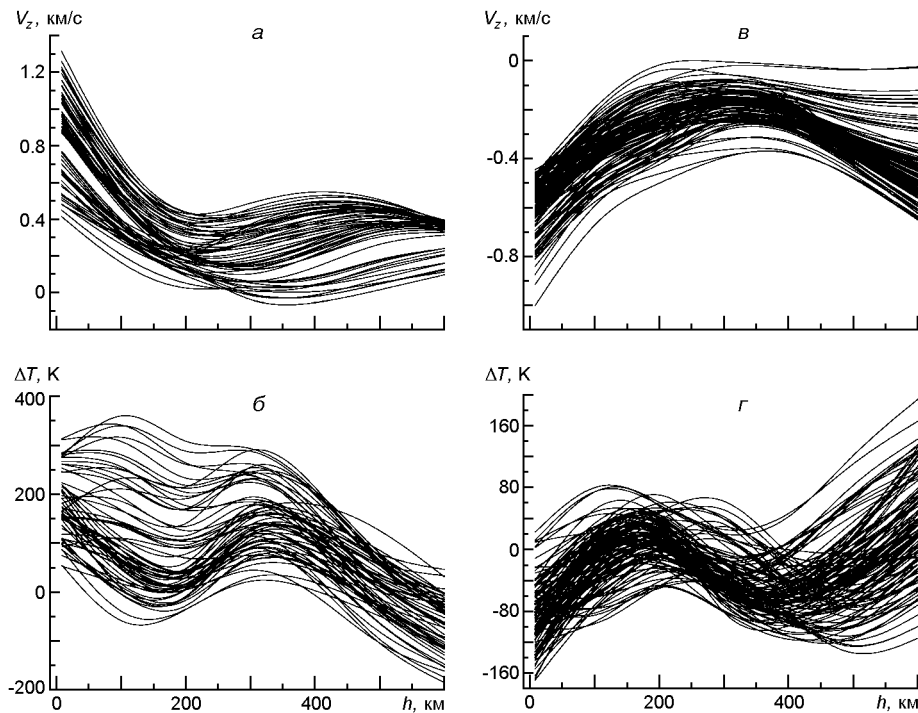


Рис. 4. Стратифікації швидкості та варіацій температури для висхідних (а, б) та низхідних (в, з) потоків

Отже, висотні залежності швидкості та варіацій температури вказують на наявність у фотосферних шарах сонячного факела дрібно-масштабного магнітного динамо. На жаль, через недостатнє просторове розділення спостережних даних ми нічого не можемо сказати про генерацію самого магнітного поля (шляхом розтягу, закручування або згину силових ліній магнітного поля). За стратифікаціями параметрів атмосфери факела ми виявили лише процеси взаємного перетворення енергії магнітного поля у механічну та теплову енергію сонячної плазми.

Як ми показали вище, магнітне поле факела по-різному впливає на фізичні умови та динаміку висхідних та низхідних потоків. Щоб отримати більш інтегральну картину впливу магнітного поля на конвекцію і зменшити модуляцію цього впливу грануляційною структурою, ми розбили досліджувану область факела на 10 малих підплощадок (див. вище) та усереднили висотні залежності варіацій температури та швидкостей за пікселами кожної підплощадки. Результати такого усереднення представлено на рис. 5.

Таким чином, в областях факела з сильним магнітним полем (магнітна індукція більша за 1 кГс) температура шарів середньої фотосфери на декілька десятків градусів нижча, в області температурного мінімуму та нижньої хромосфери — суттєво вища. З іншого боку, в областях зі слабким магнітним полем (магнітна індукція менша за

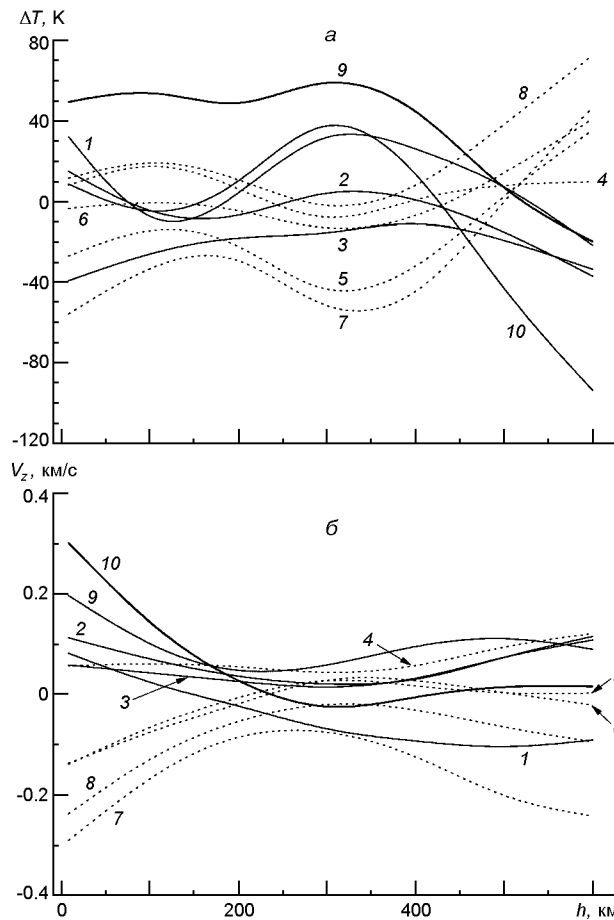


Рис. 5. Усереднені стратифікації варіацій температури та швидкості. Номери кривих відповідають номерам площадок вздовж вибраної області (згідно з рис. 1). Штрихові лінії — для площадок з усередненим магнітним полем понад 1 кГс (середня частина факела), суцільні лінії — для площадок зі слабким магнітним полем (< 1 кГс)

1 кГс) температура шарів середньої фотосфери збільшена, а у верхній фотосфері та нижній хромосфері — зменшена. Отримані висновки узгоджуються з представленими вище даними для стратифікацій варіацій температури та z -проекції швидкості, оскільки вони були отримані шляхом просторового усереднення у межах відповідних підплощадок.

Висотні залежності z -проекції швидкостей чітко вказують на переважання низхідних потоків у областях, де магнітне поле перевищує 1 кГс, тоді як в областях факела, де магнітне поле слабше, домінують висхідні потоки. Отримані результати узгоджуються з висновками роботи [15].

Отже, в умовах сонячного факела усереднена дія магнітного поля на фотосферну конvekцію призводить до переважання низхідних потоків в областях з сильним магнітним полем (> 1 кГс), тоді як в областях зі слабким полем (< 1 кГс) переважають висхідні потоки. А інтегральна дія дрібномасштабного магнітного динамо проявляється у

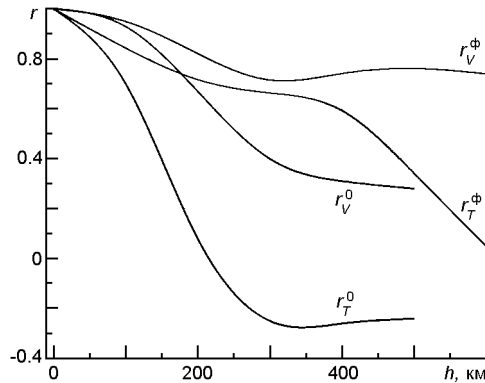


Рис. 6. Висотні залежності коефіцієнтів кореляції для T та V_z , отримані в рамках моделей факела (r_T^ϕ, r_V^ϕ) та спокійної атмосфери (r_T^0, r_V^0)

зменшенні температури і сповільненні руху переважаючого низхідного потоку в шарах середньої фотосфери в областях факела з сильним магнітним полем (> 1 кГс), тоді як в областях факела зі слабким полем (< 1 кГс) має місце підвищення температури і прискорення руху переважаючого висхідного потоку в шарах середньої фотосфери.

Стабілізація конвекції магнітним полем факела. Магнітне поле по-різному впливає на конвекцію в атмосфері Сонця: з одного боку воно стабілізує її [15], тобто спрямовує рух речовини по гвинтових траєкторіях вздовж силових ліній; рух при цьому стає більш впорядкованим, а з іншого — поле робить рух більш дрібномасштабним, причому ці масштаби визначаються як самим магнітним полем, так і швидкістю хаотичного руху речовини. До того ж магнітне поле зменшує газовий тиск, внаслідок чого ефективність конвективного переносу енергії зменшується.

Розглянемо вплив магнітного поля факела на конвекцію у фотосферних шарах Сонця. При цьому будемо розглядати всю факельну площадку. За міру характеристики впливу магнітного поля на конвекцію будемо брати коефіцієнт кореляції відповідного параметра на висоті $h = 0$ км з цим же параметром на висоті h . Отримані в рамках моделей факела та спокійної атмосфери залежності коефіцієнта кореляції для швидкості (r_V) та варіацій температури (r_T) від висоти представлено на рис. 6.

Отже, грануляційна структура факела у полі швидкостей завдяки магнітному полю зберігається до висот нижньої хромосфери. Справді, через наявність магнітного поля коефіцієнт кореляції r_V на $h = 600$ км зменшується всього лиш до 0.7. Тобто, магнітне поле стабілізує фотосферну конвекцію, при цьому інверсія швидкостей проявляється значно рідше, ніж в умовах спокійної атмосфери. Аналогічний висновок про стабілізацію конвекції отримано в роботі [15] при дослідженні сонячного факела та у роботі [5] при дослідженні рухів фотосферної плазми в активній області.

Як видно з рис. 6, на висотах $h = 200...400$ км коефіцієнт кореляції для швидкості набуває мінімальних значень, що пов'язано із процесом взаємного перетворення магнітної та механічної енергії у цих шарах. В умовах спокійної атмосфери відповідний коефіцієнт кореляції різко зменшується з висотою, і вже на висоті 500 км становить 0.3.

Стратифікація коефіцієнта кореляції для варіацій температури має доволі складний характер: від 0 до 200 км кореляція суттєво слабшає, що зумовлено першою інверсією температурних варіацій та наявністю їхньої дрібномасштабної складової. На висотах від 200 км до 400 км зменшення коефіцієнта кореляції сповільнюється: в цих шарах взаємне перетворення магнітної та кінетичної + теплової енергії спричиняє додатні температурні варіації у висхідних потоках та від'ємні варіації у низхідних, внаслідок чого зменшення коефіцієнта кореляції з висотою сповільнюється. У верхній фотосфері та нижній хромосфері $h > 400$ км починає проявлятися друга температурна інверсія, внаслідок чого кореляція знову різко слабшає. В умовах спокійної атмосфери Сонця інверсія температури відбувається в нижніх шарах фотосфери: на висотах $h > 200$ км кореляція стає від'ємною, а подвійна інверсія температури у фотосферних шарах не проявляється.

ВИСНОВКИ

За даними комплексних 2D-спостережень у лінії $\text{Ba II } 455.403$ нм шляхом розв'язання оберненої задачі нерівноважного переносу випромінювання отримано 3D-модель факельної площадки. Оцінку магнітного поля зроблено за даними синхронних спектрополяриметричних спостережень у лінії $\text{Fe I } 1564.8$ нм.

Досліджено вплив магнітного поля на фотосферну конвекцію. За особливостями висотних залежностей швидкості та варіацій температури, які зумовлені, зокрема, наявністю магнітного поля факела, ми виявили прояви локального магнітного динамо у фотосферних шарах сонячного факела, тобто в шарах середньої фотосфери відбувається взаємне перетворення енергії магнітного поля у механічну та теплову енергію сонячної плазми.

Інтегральна дія дрібномасштабного магнітного динамо проявляється у зменшенні температури і сповільненні руху переважаючого низхідного потоку в шарах середньої фотосфери в областях факела з сильним полем (> 1 кГс), тоді як в областях факела зі слабким полем (< 1 кГс) має місце підвищення температури і прискорення руху переважаючого висхідного потоку в шарах середньої фотосфери.

В рамках кореляційного підходу ми показали, що магнітне поле стабілізує фотосферну конвекцію в області факела, а дрібномасштабне магнітне динамо зумовлює у фотосферних шарах факела подвійну температурну інверсію.

ФІНАНСУВАННЯ РОБОТИ

Роботу виконано за часткової підтримки Міністерства освіти та науки України у Львівському національному університеті імені Івана Франка в рамках науково-дослідної роботи згідно з проектом АО-91Ф.

1. Баран О. А., Стоділка М. І. Структура фотосферної конвекції Сонця на грануляційних і мезогрануляційних масштабах. *Кинематика и физика небес.* тел. 2015. 31. № 2. С. 21—33.
2. Костык Р. И. Влияние магнитного поля на тонкую структуру конвективных движений в солнечной атмосфере. *Кинематика и физика небес. тел.* 2012. 28. № 4. С. 3—14.
3. Костык Р. И. Что такое солнечные факелы? *Кинематика и физика небес. тел.* 2013. 29. № 1. С. 50—57.
4. Ольшевский В. Л., Щукина Н. Г., Васильева И. Э. НЛТР-образование резонансной линии Ва II 455.4 нм в солнечной атмосфере. *Кинематика и физика небес. тел.* 2008. 24. № 3. С. 198—215.
5. Пасечник М. Н. Спектральное исследование бомб Эллермана. Фотосфера. *Кинематика и физика небес. тел.* 2018. 34. № 2. С. 25—45.
6. Присяжний А. І., Стоділка М. І., Щукіна Н. Г. Стійкий метод визначення напруженості магнітного поля у фотосфері Сонця. *Кинематика и физика небес. тел.* 2018. 34. № 6. С. 3—21.
7. Стоділка М. І., Присяжний А. І. Диагностика атмосфери Сонця інверсионним неЛТР-методом: лінія Ва II 455.403 нм. *Кинематика и физика небес. тел.* 2016. 32. № 1. С. 33—42.
8. Стоділка М. І. Тихонівські стабілізатори в інверсних задачах спектральних досліджень. *Кинематика и физика небес. тел.* 2003. 19. № 4. С. 334—343.
9. Borrero J. M., Jafarzadeh S., Schüssler M., Solanki S. K. Solar magnetoconvection and small-scale dynamo. Recent developments in observation and simulation. *Space Sci. Rev.* 2017. 210. № 1-4. P. 275—316.
10. Buehler D., Lagg A., Solanki S. K., van Noort M. Properties of solar plage from a spatially coupled inversion of Hinode SP data. *Astron. and Astrophys.* 2015. 576. id. A27. P. 1—19.
11. Chapman G. A., Sheeley N. R. Jr. The photospheric network. *Solar Phys.* 1968. 5. № 4. P. 442—461.
12. Cristaldi A., Ermolli I. 1D atmosphere models from inversion of Fe I 630 nm observations with an application to solar irradiance studies. *Astrophys. J.* 2017. 841. № 2. article id. 115. P. 1—15.
13. Hotta H., Rempel M., Yokoyama T. Efficient small-scale dynamo in the solar convection zone. *Astrophys. J.* 2015. 803. № 1. article id. 42. P. 1—14.
14. Keller C. U., Schüssler M., Vögler A., Zakharov V. On the origin of solar faculae. *Astrophys. J.* 2004. 607. № 1. P. L59—L62.
15. Kostik R., Khomenko E. V. Properties of convective motions in facular regions. *Astron. and Astrophys.* 2012. 545. id. A22. P. 1—9.
16. Kostik R., Khomenko E. Properties of oscillatory motions in a facular region. *Astron. and Astrophys.* 2013. 559. id. A107. P. 1—10.
17. Norris C. M., Beeck B., Unruh Y. C. et al. Spectral variability of photospheric radiation due to faculae. I. The Sun and Sun-like stars. *Astron. and Astrophys.* 2017. 605. id. A45. P. 1—15.

18. Okunev O. V., Kneer F. Numerical modeling of solar faculae close to the limb. *Astron. and Astrophys.* 2005. 439. № 1. P. 323—334.
19. Petrovay K., Szakaly G. The origin of intranetwork fields: a small-scale solar dynamo. *Astron. and Astrophys.* 1993. 274. P. 543—554.
20. Rutten R. J. Extreme limb observations of Ba II 4554 and Mg I 4571. *Solar Phys.* 1977. 51. № 1. 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. № 2. P. 237—262.
22. Rutten R. J., Milkey R. W. Partial redistribution in the solar photospheric Ba II spectrum. *Astrophys. J.* 1979. 231. P. 277—283.
23. Shchukina N. G., Olshevsky V. L., Khomenko E. V. The solar Ba II 4554 A line as a Doppler diagnostic: NLTE analysis in 3D hydrodynamical model. *Astron. and Astrophys.* 2009. 506. № 3. P. 1393—1404.
24. Socas-Navarro H. Semiempirical models of solar magnetic structures. *Astrophys. J. Suppl. Ser.* 2007. 169. № 2. P. 439—457.
25. Steiner O. Radiative properties of magnetic elements. II. Center to limb variation of the appearance of photospheric faculae. *Astron. and Astrophys.* 2005. 430. P. 691—700.
26. Vernazza J. E., Avrett E. H., Loeser R. Structure of the solar chromosphere. III. Models of the EUV brightness components of the quiet Sun. *Astrophys. J. Suppl. Ser.* 1981. 45. P. 635—725.

REFERENCES

1. Baran O. A., Stodilka M. I. (2015) Convection structure in the solar photosphere at granulation and mesogranulation scales. *Kinematics Phys. Celestial Bodies.* 31(2). P. 65—72.
2. Kostyk R. I. (2012) Magnetic field effect on the fine structure of convective motions in the solar atmosphere. *Kinematics Phys. Celestial Bodies.* 28(4). 155—161.
3. Kostyk R. I. (2013) What are solar faculae? *Kinematics Phys. Celestial Bodies.* 29(1). 32—36.
4. Ol'shevskii V. L., Shchukina N. G., Vasil'eva I. E. (2008) NLTR-formation of the Ba II 455.4 nm resonance line in the solar atmosphere. *Kinematics Phys. Celestial Bodies.* 24(3). 145—158.
5. Pasechnik M. N. (2018) Spectral study of Ellerman bombs. Photosphere. *Kinematics Phys. Celestial Bodies.* 34(2). P. 68—81.
6. Prysiaznyi A. I., Stodilka M. I., Shchukina N. G. (2018) Robust method for determination of magnetic field strength in the solar photosphere. *Kinematics Phys. Celestial Bodies.* 34(6). 277—289.
7. Stodilka M. I., Prysiaznyi A. I. (2016) Diagnostics of the solar atmosphere by the Non-LTE inversion method: Line of Ba II 455.403 nm. *Kinematics Phys. Celestial Bodies.* 32(1). 23—29.
8. Stodilka M. I. (2003) The Tychonoff stabilizers in inverse problems of spectral studies. *Kinematics Phys. Celestial Bodies.* 19(4). 229—235.
9. Borrero J. M., Jafarzadeh S., Schüssler M., Solanki S. K. (2017) Solar magnetoconvection and small-scale dynamo. Recent developments in observation and simulation. *Space Sci. Rev.* 210(1-4). 275—316.
10. Buehler D., Lagg A., Solanki S. K., van Noort M. (2015) Properties of solar plage from a spatially coupled inversion of Hinode SP data. *Astron. and Astrophys.* 576. id. A27. 1—19.

11. Chapman G. A., Sheeley N. R. Jr. (1968) The Photospheric Network. *Solar Phys.* 5(4). 442—461.
12. Cristaldi A., Ermolli I. (2017) 1D atmosphere models from inversion of Fe I 630 nm observations with an application to solar irradiance studies. *Astrophys. J.* 841(2). article id. 115. 1—15.
13. Hotta H., Rempel M., Yokoyama T. (2015) Efficient small-scale dynamo in the solar convection zone. *Astrophys. J.* 803(1). article id. 42. 1—14.
14. Keller C. U., Schüssler M., Vögler A., Zakharov V. (2004) On the origin of solar faculae. *Astrophys. J.* 607(1). L59—L62.
15. Kostik R., Khomenko E. V. (2012) Properties of convective motions in facular regions. *Astron. and Astrophys.* 545. id. A22. P. 1—9.
16. Kostik R., Khomenko E. (2013) Properties of oscillatory motions in a facular region. *Astron. and Astrophys.* 559. id. A107. P. 1—10.
17. Norris C. M., Beeck B., Unruh Y. C., et al. (2017) Spectral variability of photospheric radiation due to faculae. I. The Sun and Sun-like stars. *Astron. and Astrophys.* 605. id. A45. P. 1—15.
18. Okunev O. V., Kneer F. (2005) Numerical modeling of solar faculae close to the limb. *Astron. and Astrophys.* 439(1). 323—334.
19. Petrovay K., Szakaly G. (1993) The origin of intranetwork fields: a small-scale solar dynamo. *Astron. and Astrophys.* 274. 543—554.
20. Rutten R. J. (1977) Extreme limb observations of Ba II 4554 and Mg I 4571. *Solar Phys.* 51(1). 3—24.
21. Rutten R. J. (1978) Empirical NLTE analyses of solar spectral lines. II - The formation of the Ba II 4554 resonance line. *Solar Phys.* 56(2). 237—262.
22. Rutten R. J., Milkey R. W. (1979) Partial redistribution in the solar photospheric Ba II spectrum. *Astrophys. J.* 231. P. 277—283.
23. Shchukina N. G., Olshevsky V. L., Khomenko E. V. (2009) The solar Ba II 4554 A line as a Doppler diagnostic: NLTE analysis in 3D hydrodynamical model. *Astron. and Astrophys.* 506(3). 1393—1404.
24. Socas-Navarro H. (2007) Semiempirical Models of Solar Magnetic Structures. *Astrophys. J. Suppl. Ser.* 169(2). 439—457.
25. Steiner O. (2005) Radiative properties of magnetic elements. II. Center to limb variation of the appearance of photospheric faculae. *Astron. and Astrophys.* 430. 691—700.
26. Vernazza J. E., Avrett E. H., Loeser R. (1981) Structure of the solar chromosphere. III. Models of the EUV brightness components of the quiet Sun. *Astrophys. J. Suppl. Ser.* 45. 635—725.

М. І. Стоділка¹, А. І. Присяжний¹, Р. І. Костык²

¹Астрономическая обсерватория Львовского национального университета имени Ивана Франко, Львов, Украина

²Главная астрономическая обсерватория Национальной академии наук Украины, Киев, Украина

ОСОБЕННОСТИ КОНВЕКЦИИ В АТМОСФЕРНЫХ СЛОЯХ СОЛНЕЧНОГО ФАКЕЛА

По данным комплексных 2D-наблюдений на телескопе VTT солнечного факела путем решения обратной задачи переноса излучения в линии Ba II 455.4 нм получена 3D-модель солнечной атмосферы в области факельной площадки. Оценка магнит-

ного поля виконана по V -профілям Стокса лінії Fe I 1564.8 нм. Исследовано вплив магнітного поля на фотосферну конвекцію: розглянуті просторові варіації температури і швидкостей на різних висотах. Обнаружені проявлення локального магнітного динамо в фотосферних шарах сонячного факела: в шарах середньої фотосфери здійснюється взаємне перетворення механічної і теплової енергії сонячної плазми в магнітну енергію. Інтегральне вплив мелкомасштабного магнітного динамо зводиться до зменшенню температури і сповільненню руху переважаючого нисхідного потоку в шарах середньої фотосфери в областях факела з сильним полем (більше 1 кГс), тоді як в областях факела з слабким полем (менше 1 кГс) здійснюється підвищення температури і прискорення руху переважаючого висхідного потоку в шарах середньої фотосфери. Показано, що магнітне поле факела стабілізує фотосферну конвекцію, а мелкомасштабне магнітне динамо обумовлює в фотосферних шарах факела подвійну температурну інверсію.

Ключові слова: Сонце, фотосфера, факели, діагностика, магнітне динамо.

M. I. Stodilka¹, A. I. Prysiaznyi¹, R. I. Kostyk²

¹Astronomical Observatory of Ivan Franko National University, Lviv, Ukraine

²Main Astronomical Observatory of National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

FEATURES OF CONVECTION IN THE ATMOSPHERE LAYERS OF THE SOLAR FACULA

According to the data of complex 2D observations on the VTT telescope of the solar facula, a 3D model of the solar atmosphere in the facular region was obtained by solving the inverse radiative transfer problem in the Ba II 4554 Å line. The magnetic field was estimated using the Stokes V -profiles of the Fe I 15648 Å line. The influence of magnetic field on photospheric convection was investigated: spatial variations in temperature and velocities at different heights were considered. It is shown that the mutual transformation of the mechanical and thermal energy of the solar plasma into magnetic energy occurs in the layers of the middle photosphere. The integral effect of a small-scale magnetic dynamo leads to lowering the temperature and slowing down the movement of the predominant downward flows in the layers of the middle photosphere in the facular regions with a strong field (greater than 1 kG), while in the facular regions with a weak field (less than 1 kG) there is an increase in temperature and acceleration of the movement of the predominant upward flows in the layers of the middle photosphere. It is shown that the magnetic field of the facula stabilizes photospheric convection, and the small-scale magnetic dynamo causes a double temperature inversion in the photospheric layers of the facula.

Keywords: Sun, photosphere, faculae, diagnostics, magnetic dynamo.

Стаття надійшла до редакції 14.05.2019

Після доопрацювання 21.06.2019

Прийнята до друку 21.06.2019