

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ГОЛОВНА АСТРОНОМІЧНА ОБСЕРВАТОРІЯ

ПРИСЯЖНИЙ Андрій Ігорович

УДК 523.942

**ФІЗИЧНІ УМОВИ У НЕОДНОРІДНІЙ
ЗАМАГНІЧЕНІЙ ФОТОСФЕРІ СОНЦЯ**

01.03.03 – Геліофізика і фізика Сонячної системи

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Київ – 2020

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Львівському національному університеті імені Івана Франка Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник:

доктор фізико-математичних наук, старший науковий співробітник
Стоділка Мирослав Іванович,
Астрономічна обсерваторія
Львівського національного університету імені Івана Франка
МОН України,
головний науковий співробітник відділу фізики Сонця.

Офіційні опоненти:

доктор фізико-математичних наук, старший науковий співробітник
Лозицький Всеволод Григорович,
Астрономічна обсерваторія
Київського національного університету імені Тараса Шевченка,
провідний науковий співробітник відділу астрофізики;

кандидат фізико-математичних наук,
старший науковий співробітник
Осіпов Сергій Миколайович,
Головна астрономічна обсерваторія НАН України,
старший науковий співробітник відділу фізики Сонця.

Захист відбудеться 26 листопада 2020 р. на засіданні Спеціалізованої вченої ради Д 26.208.01 при Головній астрономічній обсерваторії НАН України за адресою: 03143, м. Київ, вул. Академіка Заболотного, 27, ГАО НАН України.

Початок засідань о 10 годині.

З дисертацією можна ознайомитися в науковій бібліотеці ГАО НАН України за адресою: 03143, м. Київ, вул. Академіка Заболотного, 27, ГАО НАН України.

Автореферат розіслано «22» жовтня 2020 р.

Учений секретар Спеціалізованої вченої ради
кандидат фізико-математичних наук

І.Е. Васильєва

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Магнітне поле Сонця проявляється на різних просторових масштабах – у вигляді глобального поля, яке охоплює всю поверхню Сонця, магнітних полів сонячних плям та пор в активних областях та дрібно-масштабних магнітних полів. Магнітне поле в нижніх шарах сонячної атмосфери структуроване на найменших спостережуваних масштабах, аж до дифракційної межі розділення найкращих сучасних телескопів. Фізику процесів, які протікають в атмосфері Сонця, вивчають, з одного боку, за допомогою магнітогідродинамічного (МГД) моделювання. Однак, з іншого боку, одним із ефективних методів отримання інформації про структуру та фізичні умови в атмосфері Сонця є розв'язання інверсної задачі переносу випромінювання, що дозволяє будувати напівемпіричні моделі реальної атмосфери Сонця.

Дослідження природи магнітних утворень у фотосфері Сонця з використанням інверсних методів складає основу цієї дисертаційної роботи.

Актуальність теми. Грануляційні потоки у фотосфері виштовхують магнітне поле до міжгранульних проміжків, де формуються дрібномасштабні магнітні концентрації із переважно вертикальним полем, напруженість якого перевищує один кілогаус. З цими дрібномасштабними концентраціями поля пов'язані сонячні факели і яскраві точки, найбільш помітні після сонячних плям прояви магнетизму у нижній атмосфері Сонця. В факелах ми можемо спостерігати вплив відносно сильного магнітного поля на фотосферну конвекцію, що цікаво з фізичної точки зору. Також дослідження властивостей сонячних факелів є важливим, оскільки контраст факелів впливає на варіації сонячної сталої.

Вважається, що високі значення напруженості магнітного поля в магнітних концентраціях можуть бути результатом процесу конвективного колапсу трубок магнітного потоку. В результаті конвективного колапсу або взаємодії низхідного потоку в магнітних трубках із магнітним полем динамічного навколишнього середовища можуть утворюватись джейти – інтенсивні вузькоспрямовані потоки плазми з високими швидкостями. Оскільки магнітні трубки розповсюджені по всій поверхні Сонця і концентрація таких утворень є високою, то фотосферні джейти можуть мати значний вплив на динаміку та енергетику спокійної атмосфери Сонця.

У спокійній атмосфері супергрануляційні потоки концентрують дрі-

бномасштабні магнітні елементи на границях супергранул, утворюючи фотосферну магнітну сітку Сонця. Відомо, що внесок сіткових магнітних полів у глобальний магнетизм Сонця є співмірним з внеском активних ділянок у максимумі сонячної активності. Аналіз даних з високим просторовим та часовим розділенням свідчить про те, що одним із головних елементів супергрануляції є сімейства гранул, які утворюються внаслідок процесу фрагментації грануляційних потоків. Горизонтальні потоки, пов'язані із цими довгоживучими елементами грануляції, суттєво впливають на форму магнітної сітки.

На сьогодні залишаються не до кінця з'ясованими багато питань, які стосуються дрібномасштабних магнітних утворень в атмосфері Сонця та довгоживучих елементів сонячної грануляції, зокрема:

- На даний час не до кінця встановлено природу недавно відкритого явища – фотосферних джетів. Невідомо, чи джети є проявами руху речовини всередині магнітних петель, чи результатом перезамикання магнітних полів, чи наслідком подій конвективного колапсу магнітних трубок.
- Недостатньо досліджено особливості фотосферної конвекції на грануляційних масштабах в області факельної площадки, вплив магнітного поля на конвекцію. Досі залишається відкритим питання про роль дрібномасштабного магнітного динамо при генерації сіткових магнітних полів та полів факелів.
- На сьогодні недостатньо вивченими залишаються фізичні умови, що призводять до формування довгоживучих елементів сонячної грануляції. Недостатньо добре досліджено вплив варіацій термодинамічних параметрів на процес фрагментації грануляційних потоків.

Наявність прецизійних спостережень і високочутливих методів обробки дозволяє виконати шляхом розв'язання інверсної задачі переносу випромінювання коректну та достовірну діагностику структури і динаміки магнітних утворень та конвективних потоків в атмосфері Сонця.

Вищенаведені обставини визначили мету дисертації.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Робота виконувалась в Астрономічній обсерваторії Львівського національного університету імені Івана Франка в межах виконання держбюджетних тем:

- “Структура і динаміка проникаючої конвекції та хвильових процесів в реальній атмосфері Сонця” (номер державної реєстрації 0113U003061),

- “Перенос випромінювання в неоднорідній плазмі атмосфери Сонця та в небулярних середовищах; сонячна активність – геофізичні прояви” (номер державної реєстрації 0116U001545),
 - “Сонячна та міжзоряна плазма: магнетизм, динаміка та геофізичні прояви активності Сонця” (номер державної реєстрації 0119U002211),
- в яких здобувач був виконавцем.

Мета і задачі дослідження. Основна мета роботи – дослідити фізичні умови та динаміку замагніченої сонячної плазми у фотосфері Сонця, вплив магнітного поля на фотосферну конвекцію, вплив варіацій термодинамічних параметрів на процес фрагментації грануляційних потоків, використавши дані спостережень з високим просторовим і часовим розділенням та застосувавши сучасні методи діагностики атмосфери Сонця.

Для цього необхідно розв’язати наступні задачі:

- розв’язати інверсну задачу нерівноважного переносу випромінювання в лінії $\text{Ba II } \lambda 455.403 \text{ нм}$ та дослідити діагностичні можливості цієї лінії при вивченні фізичних умов у атмосфері Сонця;
- розробити стійкий метод експрес-діагностики магнітного поля у фотосфері Сонця; за допомогою цього методу визначити просторовий розподіл напруженості магнітного поля в межах факельної площадки;
- на основі спостережуваних профілів спектральних ліній барію та заліза шляхом розв’язку оберненої задачі переносу випромінювання побудувати 3D-моделі неоднорідної фотосфери Сонця, в тому числі: джетів та факельної площадки; побудувати модель ділянки фотосфери, у якій присутні довгоживучі конвективні потоки;
- в рамках отриманих напівемпіричних моделей атмосфери дослідити фізичні умови всередині та в околі фотосферних джетів, дослідити динаміку джетів;
- вивчити особливості фотосферної конвекції в межах факельної площадки, вплив магнітного поля на конвекцію;
- дослідити динаміку та еволюцію довгоживучих елементів сонячної грануляції; дослідити взаємозв’язок між просторово-часовими варіаціями термодинамічних параметрів і процесом фрагментації гранул.

Об’єкт дослідження: неоднорідна атмосфера Сонця, магнітні утворення у фотосфері Сонця, довгоживучі елементи сонячної грануляції.

Предмет дослідження: фізичні умови в замагніченій плазмі атмосфери Сонця: в околі фотосферних джетів та в межах факельної площадки, вплив магнітного поля на конвекцію, динаміка та еволюція довгоживучих елементів сонячної грануляції.

Методи досліджень: пряма та обернена задачі нерівноважного переносу випромінювання; модифікований метод визначення напруженості магнітного поля за спостережуваними V -профілями Стокса лінії Fe I λ 1564.8 нм; новий метод визначення поля горизонтальних швидкостей на грануляційних та субгрануляційних масштабах за даними 2D-спостережень у центрі диска Сонця; багатовимірний фур'є-аналіз даних: $(k - \omega)$ -фільтрація для виділення конвективних рухів.

Наукова новизна отриманих результатів.

1. Досліджено активні утворення в спокійній фотосфері – фотосферні джети. Локалізовано центри енерговиділення. Вперше на базі нового підходу було досліджено поле горизонтальних швидкостей в околі фотосферних джетів.
2. Вперше було побудовано 3D-модель сонячного факела шляхом розв'язання інверсної задачі для лінії Ba II λ 455.403 нм. Досліджено вплив магнітного поля на фотосферну конвекцію. За особливостями висотних залежностей швидкості та варіацій температури виявлено прояви локального магнітного динамо у фотосферних шарах сонячного факела.
3. При аналізі впливу варіацій тиску на процес фрагментації грануляційних потоків у точках розгалуження “тілок” грануляційних “дерев” виявлено збільшення варіацій тиску; показано, що у нижній фотосфері варіації тиску в гранулах, які фрагментуються, значно більші за варіації тиску в гранулах, які розчиняються в навколишньому середовищі.
4. Вперше на основі тривимірної гідродинамічної моделі виконано дослідження діагностичних можливостей лінії Ba II λ 455.403 нм для вивчення атмосфери Сонця інверсними методами. Показано, що використання інверсних методів при аналізі спостережень в цій лінії дозволяє відтворювати фізичні умови в шарах фотосфери і нижньої хромосфери.
5. Запропоновано модифікацію методу оцінювання модуля вектора напруженості магнітного поля за спостережуваними V -профілями Стокса лінії Fe I λ 1564.8 нм.

Практичне значення одержаних результатів. Результати дослідження неоднорідної замагніченої плазми фотосфери Сонця та довгоживучих елементів сонячної грануляції мають теоретичне і практичне застосування.

Результати діагностики магнітного поля, інформацію про термодинамічні та кінематичні параметри атмосфери в околі джетів, дані про характеристики та еволюцію довгоживучих елементів сонячної грануляції можна використовувати для тестування теоретичних моделей активних утворень в замагніченій атмосфері Сонця.

Дослідження фотосферної конвекції в області факела сприяє кращому розумінню фізики взаємодії конвективних потоків та магнітних полів.

Наукові результати дисертаційної роботи дають цінну інформацію, необхідну при: розв'язанні проблем фізики Сонця та сонячно-земних зв'язків, дослідженні замагніченої сонячної плазми та її динаміки, вивченні фізичних умов у неоднорідній атмосфері Сонця, побудові моделей дрібномасштабних магнітних утворень, дослідженні дрібномасштабного динамо у фотосфері Сонця.

Достовірність та обґрунтованість результатів досліджень. Результати роботи опубліковано у фахових реферованих журналах та апробовано на міжнародних наукових конференціях.

Особистий внесок здобувача. Всі результати, викладені у дисертації, отримані при безпосередній участі здобувача.

У роботах [1, 2] здобувач брав участь у опрацюванні спостережуваного матеріалу, аналізував результати досліджень, брав участь у формулюванні висновків та написанні текстів статей.

У роботі [3] здобувач приймав активну участь в обговоренні постановки наукових завдань та виборі методик розрахунків, брав участь у опрацюванні спостережуваного матеріалу та проведенні розрахунків, аналізував результати досліджень, брав участь у формулюванні висновків та написанні тексту статті.

У роботах [4, 5] здобувач брав участь у опрацюванні спостережуваного матеріалу та проведенні розрахунків, проводив аналіз одержаних результатів досліджень, брав участь у формулюванні висновків та написанні текстів статей.

Апробація результатів досліджень. Результати, отримані в межах цієї дисертаційної роботи, були представлені та обговорювалися на таких наукових конференціях та семінарах:

- VIII, IX Міжнародних наукових конференціях “Вибрані питання астрономії та астрофізики”, присвячених пам’яті Б. Т. Бабія (м. Львів, 2016, 2018 рр.);
- Young Scientists’ Conferences on Astronomy and Space Physics (YSC’23, YSC’24, YSC’25, YSC’26) (м. Київ, 2016, 2017, 2018, 2019 рр.);
- астрофізичних семінарах Астрономічної обсерваторії Львівського національного університету імені Івана Франка;

Публікації. Результати дисертаційної роботи опубліковано у 5 статтях у реферованих фахових журналах [1–5] та у 6 збірниках тез міжнародних наукових конференцій [6–11].

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається з переліку умовних позначень, вступу, п’яти розділів, висновків, списку використаних джерел та одного додатку. Загальний обсяг тексту роботи становить 164 сторінки. Текст роботи містить 4 таблиці, 32 рисунки та 345 найменувань у списку використаних джерел.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** дається загальна характеристика роботи, обґрунтовується актуальність теми дисертації, формулюються мета і задачі дослідження, визначаються наукова новизна і практична цінність отриманих результатів, зазначено особистий внесок здобувача у спільних роботах, приводяться дані стосовно апробації роботи, публікацій за темою досліджень.

У **розділі 1 “Сучасний стан проблеми діагностики замагніченої плазми в атмосфері Сонця”** представлено широкий та детальний огляд ранніх та сучасних праць з дослідження фотосферних джетів, сонячних факелів та довгоживучих елементів сонячної грануляції, враховуючи спостереження, теоретичні роботи і чисельне моделювання атмосфери Сонця. Проаналізовано основні здобутки у вивченні взаємного впливу фотосферної конвекції та магнітного поля, відмічено недоліки існуючих робіт та обґрунтовано потребу в подальших дослідженнях фізичних процесів, що відбуваються у неоднорідній замагніченій атмосфері Сонця.

Протягом останнього десятиліття було опубліковано низку праць, у яких досліджуються описані у більш ранніх роботах високошвидкісні потоки у фотосфері – фотосферні джети [21, 27, 30, 32, 34]. Встановлено основні параметри цих подій – характерні розміри, середню тривалість, частоту появи на диску Сонця. Однак значна частина цих робіт присвячена статистичному аналізу даних спостережень, у той час як моделюванню фізичних умов у джетах було приділено менше уваги. Відомо, що високошвидкісні потоки можуть утворюватись як під час процесу конвективного колапсу, так і внаслідок перез'єднання силових ліній магнітного поля. Однак характеристики такого процесу перез'єднання досі залишаються недостатньо дослідженими, незважаючи на використання реалістичних МГД-моделювань [24]. Таким чином, дослідження фізичних умов у джетах та оточуючій фотосфері за напівемпіричними моделями, отриманими шляхом розв'язання інверсної задачі переносу випромінювання, залишається актуальною задачею.

Сонячні факели були об'єктом активних досліджень протягом останніх десятиліть [20, 23, 28, 29]. Це пов'язано переважно з тим, що факели мають суттєвий внесок у варіації сонячної сталості. Значна частина робіт, які стосуються дослідження сонячних факелів, присвячена визначенню їх контрасту, а саме – варіації цієї величини від центра до лімба [40]. Незважаючи на те, що факели досліджувались як за даними спостережень, так і за результатами МГД-моделювань, досі залишаються різні точки зору на природу цих утворень [14]. Недостатньо добре досліджено процеси взаємодії конвективних потоків та відносно сильних магнітних полів у факельних ділянках.

Отже, незважаючи на тривале дослідження взаємодії фотосферної конвекції та магнітного поля, видимими проявами якої є дрібномасштабні магнітні елементи, фотосферні джети та сонячні факели, характер цієї взаємодії залишається ще не до кінця вивченим. Також недостатньо вивченим залишається зв'язок між варіаціями термодинамічних та кінематичних параметрів неоднорідної атмосфери Сонця і процесом фрагментації/злиття гранул, результатом якого є сімейства з гранул, що суттєво впливають на процес утворення та форму магнітної сітки. Таким чином, дослідження варіацій фізичних параметрів у замагніченій атмосфері Сонця за результатами сучасних спостережень з високим просторово-часовим розділенням залишається актуальним.

У розділі 2 “Методи діагностики фізичних умов у неоднорідній замагніченій фотосфері Сонця” описано методику розрахунку напівемпіричних моделей неоднорідної атмосфери Сонця шляхом розв’язання інверсної задачі переносу випромінювання. Розв’язок інверсної задачі було знайдено з умови найкращого узгодження теоретичних профілів ліній із результатами спостережень. Для знаходження розв’язку було використано ітераційну процедуру: в рамках певної початкової моделі атмосфери було розраховано теоретичні профілі ліній, за якими визначено поправки до параметрів моделі, на основі уточненої моделі знову розраховувались теоретичні профілі і т. д., поки не було виконано умову збіжності ітераційної процедури. Вхідними даними є: профілі вибраних ліній поглинання досліджуваного хімічного елемента, абсолютні значення інтенсивності в континуумі кожної лінії, стратифікація фізичних параметрів у вибраній початковій моделі атмосфери Сонця, а також набір відповідних атомних параметрів. Розв’язання інверсної задачі переносу випромінювання дає можливість отримати висотні стратифікації основних фізичних величин, які визначають стан атмосфери: температури, тиску, густини, поля вертикальних швидкостей, концентрації електронів та атомів водню і т.д.

На відміну від загальноприйнятих підходів, для побудови достовірних моделей атмосфери було використано стабілізатори Тихонова, які прибирають осциляції розв’язків та забезпечують незалежність розв’язків від вибору початкових значень відтворюваних параметрів [13, 17]. Такий підхід зводиться до модифікації цільової функції, яка характеризує подібність спостережуваних і теоретично розрахованих профілів: модифікована цільова функція є сумою звичайної цільової функції і виразу-стабілізатора $S(x)$ [13]:

$$\chi_{reg}^2 = \frac{1}{N_\lambda} \sum_{i=1}^{N_\lambda} \frac{(I_i^{obs} - I_i^{syn})^2}{\sigma_i^2} + \alpha S(x).$$

Тут N_λ – число точок профілю, I_i^{obs} – інтенсивність спостережуваного профілю лінії на довжині хвилі, якій відповідає точка профілю з індексом i , I_i^{syn} – інтенсивність теоретично розрахованого профілю, σ_i – деякі вагові множники, α – параметр регуляризації, який визначають за тестовими задачами з умови найкращого відтворення параметрів заданої моделі з вимогою незалежності розв’язку від початкових оцінок і відсутності осциляцій розв’язку. В такому підході вектор, який містить поправки до поточних значень параметрів моделі, визначається із співвідношення:

$$\delta \mathbf{x} = -\frac{\nabla \chi^2(\mathbf{x}_{old}) + 2\alpha \mathbf{H} \mathbf{x}_{old}}{\mathbf{D}(\mathbf{x}_{old}) + 2\alpha \mathbf{H}},$$

де \mathbf{D} – матриця Гессе, \mathbf{H} – матричне представлення стабілізатора, \mathbf{x}_{old} – значення параметрів на попередній ітерації.

Мінімізація цільової функції потребує розрахунку похідних від неї за кожним із вільних параметрів задачі. Для їх розрахунку було використано функції відгуку, які описують чутливість профілів ліній до варіацій параметрів моделі [16]. У випадку нерівноважного переносу випромінювання коефіцієнти випромінювання та поглинання в лінії задаються реальними заселеностями рівнів: $n_i = \beta_i \cdot n_i^*$, де n_i^* – рівноважні заселеності рівнів, β_i – коефіцієнти відхилення від ЛТР; при розрахунку функцій відгуку ми вважали їх фіксованими – наближення FDC [38]. НеЛТР-коефіцієнти було обчислено шляхом розв'язання прямої задачі переносу випромінювання. Таким чином, відповідні похідні при обчисленні функцій відгуку визначались як в наближенні ЛТР.

На кожному кроці ітераційної процедури було розв'язано пряму неЛТР-задачу переносу випромінювання, яка полягає у знаходженні сумісного розв'язку рівняння переносу та рівнянь статистичної рівноваги. Ефективним методом сумісного розв'язання рівнянь переносу і статистичної рівноваги є метод прискореної Λ -ітерації [22, 36]. Для прискорення збіжності ітераційної процедури було використано Ng-методику [19].

Наведено опис методу визначення поля горизонтальних швидкостей на грануляційних та субгрануляційних просторово-часових масштабах за спектральними 2D-спостереженнями центра диска Сонця [15]. Суть методу полягає у побудові (обернена задача переносу випромінювання) напівемпіричних моделей атмосфери Сонця з подальшим відтворенням у рамках отриманих моделей поля горизонтальних швидкостей на основі рівнянь гідродинаміки. На відміну від кореляційних методів, таких як метод локального кореляційного відслідковування або метод відслідковування особливостей, які не працюють при відтворенні горизонтальних швидкостей на просторових масштабах менше 2500 км і часових масштабах менше 30 хвилин [33], цей підхід дозволяє достатньо надійно визначати поле горизонтальних швидкостей на грануляційних та субгрануляційних просторово-часових масштабах.

Описано запропонований нами модифікований метод визначення модуля вектора напруженості магнітного поля за відстанню між спектральними положеннями піків V -профілю Стокса лінії Fe I λ 1564.8 нм.

Суть модифікації даного методу, яку ми пропонуємо, полягає у побудові апроксимаційної кривої для кожного V -профілю Стокса. В рамках даного підходу величину відстані між піками можна знайти за аналітичним співвідношенням, в яке входять коефіцієнти апроксимаційної функції. Перевага такого підходу полягає в тому, що при розрахунку відстані між піками враховується весь профіль, що дозволяє зменшити вплив шумів та асиметрії профілю на точність визначення напруженості. Було використано апроксимаційні криві, які побудовані на основі вейвлет-функції $f(x) = x \exp(-\frac{1}{2}x^2)$. На основі теоретично розрахованих та спостережуваних V -профілів показано, що модифікований метод демонструє кращу стійкість до шумів та асиметрії V -профілів Стокса у порівнянні з класичним аналогом та дозволяє більш коректно визначати напруженість магнітного поля за даними спостережень.

Для коректного розділення різних типів рухів у фотосфері Сонця ми використали багатовимірний фур'є-аналіз просторово-часової серії даних: $(k - \omega)$ -фільтрація просторово-часових варіацій дозволяє за допомогою лінії Лемба $w = v_s \cdot k_x$ (v_s – швидкість звуку) виділити конвективну складову; зворотне перетворення Фур'є дає просторово-часові варіації досліджуваних величин, зумовлених конвективними рухами.

В розділі 3 “Діагностика фотосферних джетів спокійної атмосфери Сонця” приводяться результати дослідження фотосферних джетів. Ці джети утворюються при взаємодії поля магнітної трубки з магнітним полем динамічного оточуючого середовища. У цьому дослідженні ми за даними спостережень відтворюємо висотні залежності термодинамічних і кінематичних параметрів фотосферних шарів Сонця для кожного пікселя спостережуваної області з подальшим визначенням поля горизонтальних швидкостей. Отримані стратифікації температури, густини, тиску і швидкості руху плазми використовуються для вивчення природи пояскравішання в лінії, локалізації джерела енерговиділення, вивчення динаміки і енергетики досліджуваних джетів.

Для дослідження фотосферних джетів ми використали фільтрові 2D-спостереження спокійної грануляції фотосфери в центрі диска Сонця, зняті спектрополяриметром CRISP [37] на шведському 1-м сонячному телескопі SST [35]. Спостереження були отримані М. С. Г. Льофдалем 3 травня 2014 року. Влітку 2015 року цю серію було повністю опрацьовано за допомогою конвеєра обробки даних CRISPRED [25], в результаті чого отримано два масиви спектральних зображень, придатних для дослідження. Перший масив містить зображення тільки в інтенсивно-

сті для 20 спектральних положень в околі лінії Fe I λ 557.609 нм, яка не чутлива до магнітних полів. Другий масив містить зображення в усіх чотирьох параметрах Стокса для 30 спектральних положень в околі дублету Fe I λ 630.15 нм та 630.25 нм, який чутливий до магнітних полів. Зображення в обох масивах складають часову серію з 8 послідовних сканів з інтервалом 39.83 с та повною тривалістю серії 278.6 с. Кожне зображення має 996×984 точок з розміром одного пікселя 42.94 км на поверхні Сонця. Просторове розділення всієї оптичної системи становить ~ 100 км на поверхні Сонця.

Шляхом розв'язання інверсної задачі нерівноважного переносу випромінювання було побудовано 3D гідродинамічні моделі джетів. У розрахунках ми нехтували ефектами горизонтального переносу, тому отримані моделі можна розглядати як набір одновимірних моделей. Для кожного просторового пікселя ми розв'язали обернену задачу нерівноважного переносу випромінювання. В результаті ми отримали неоднорідні моделі, що відповідають спостережуваним ділянкам спокійної атмосфери Сонця в різні моменти часу. В отриманих моделях ми відтворили як термодинамічні параметри, так і повне поле швидкостей (вертикальних і горизонтальних).

Ми виявили збільшення температури та тиску всередині джетів, що дозволяє зробити висновок про наявність джерел енерговиділення внаслідок взаємодії поля магнітної трубки із замагніченими горизонтальними потоками речовини навколо. Маючи інформацію про стратифікації вертикальної швидкості і варіацій температури, можна визначити положення центра енерговиділення у фотосферних джетах як області, в якій температурний нагрів максимальний, а вертикальна проекція променевої швидкості змінює знак. Згідно з отриманими даними такі центри локалізуються переважно в шарах середньої фотосфери на висотах від 200 до 400 км, де $\Delta T \approx 600 - 1000$ К. Максимальні швидкості досягають 6 км/с у низхідних потоках джетів у нижній фотосфері на висотах $h \approx 0$ км.

Відтворені вертикальні швидкості (проекція додатна для швидкостей, спрямованих вгору) і варіації температури $\Delta T_{i,j}(h) = T_{i,j}(h) - \bar{T}(h)$, де $\bar{T}(h)$ — середнє значення температури на висоті h , для висот 0, 200 та 400 км показані на рис. 1 для моменту часу, коли джет активний. Активність охоплює дві магнітні концентрації і область між ними. Речовина розігрівається в шарах середньої та верхньої фотосфери, тоді як у нижній фотосфері розігрів незначний. В центральній частині цієї області (температурне представлення) видно структуру, що збігається з інтенсивними потоками речовини. Поле швидкостей виявляє двона-

прямленість джета: нижче активного центра речовина рухається вниз, досягаючи максимальної швидкості ~ 4 км/с, вище активного центра вона рухається вгору, а зміна напрямку руху відбувається в середній фотосфері.

Для відтворення поля горизонтальних швидкостей, ми скористалися спостереженнями в лінії Fe I λ 557.608 нм. Згідно з розподілом горизонтальних швидкостей, в місцях знаходження джетів горизонтальна швидкість пригнічена за рахунок різкого збільшення вертикального компонента. Структура джета в полі горизонтальних швидкостей збігається з такою в представленні вертикальною швидкістю. Виявлено, що досліджуваний джет знаходився в області зіткнення двох горизонтальних потоків. При зіткненні такі зустрічні горизонтальні газові потоки постачають в місця магнітних концентрацій замагнічену плазму і запускають магнітне Perez'єднання, внаслідок якого виникають джети. В досліджуваних джетах максимальне значення швидкості становило 6 км/с, тобто виявлено лише дозвуків швидкості руху речовини.

Якісну інформацію про магнітне поле в околі джетів ми отримали з одночасних спостережень в дублеті Fe I 630.1–630.2 нм. Значення стокс-сигналу V пропорційні до магнітного потоку через площадки, що відповідають кожному пікселю зображення. Проведений аналіз вказує на те, що просторовий розподіл V -сигналу корелює з температурною структурою областей, які прилягають до джетів. Крім того, виявлено, що області найбільших швидкостей зміщені відносно областей із максимальними значеннями V -сигналу, що свідчить про те, що джети мають тенденцію виникати на краях магнітних концентрацій.

Досліджено динаміку фізичних умов у фотосферних джетах. Для цього було проведено аналіз стратифікацій надлишкового тиску і густини, як двох з основних параметрів, що визначають динаміку і стан речовини. Через великий інтервал часової дискретизації можна тільки якісно зіставити розглянутий в даний момент часу джет з відповідною фазою активності. Стратифікації надлишкового тиску для окремих пікселів всередині джетів в активній фазі і поза активністю показані на рис. 2.

Було виявлено, що на відміну від фотосферної конвекції, в джетах (незалежно від їх фази активності) надлишковий тиск досягає максимального значення в шарах середньої фотосфери і зменшується в сторону верхніх і нижніх шарів. Причому, якщо у верхніх шарах надлишковий тиск ΔP прямує до нуля, то з глибиною (на розглянутих нами висотах) ΔP зменшується до від'ємних значень. В момент активності у джетах різко збільшуються: максимальне значення надлишкового ти-

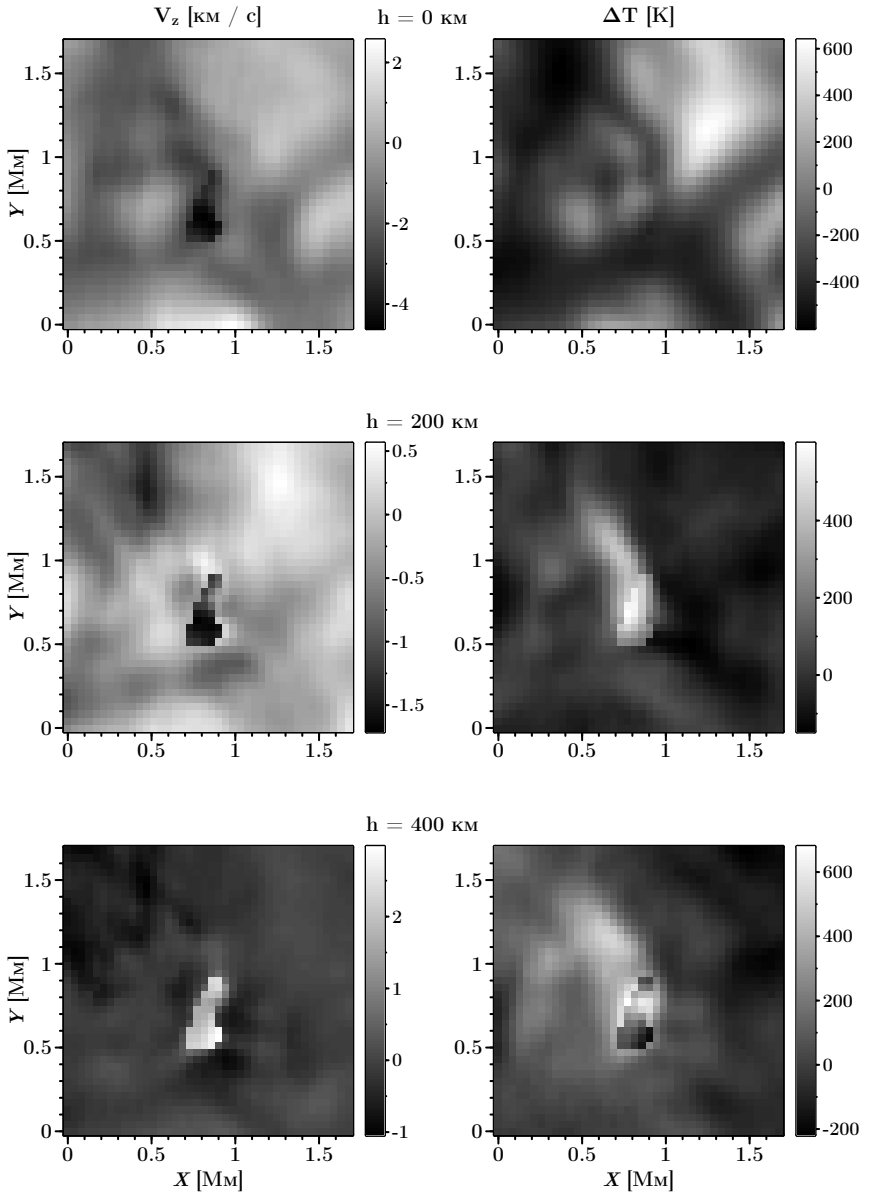


Рис. 1. Відтворені вертикальні швидкості і варіації температури для моменту часу $t_5 = 159.32$ с.

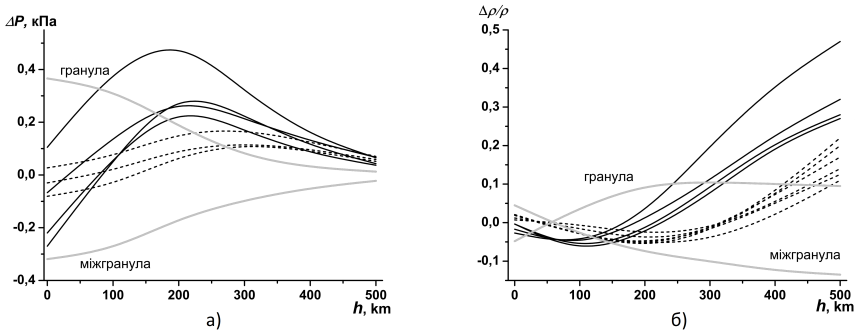


Рис. 2. Висотні залежності надлишкового тиску всередині джетів (а) та висотні залежності відносних варіацій густини всередині джетів (б). Суцільні лінії відповідають активній фазі джетів, штрихові – стратифікаціям відповідних параметрів за відсутності активності. Для порівняння наведено залежності для гранули та міжгранули (суцільні сірі лінії).

ску та його градієнт у сторону нижніх шарів. Як впливає з рис. 2, стратифікації надлишкового тиску в джетах якісно схожі між собою і в той же час відрізняються від таких для гранули і міжгранули.

Аналогічне дослідження ми виконали для густини фотосферної плазми. Оскільки густина речовини різко зменшується з висотою, ми розглядали відносні варіації густини $\Delta\rho(h)/\bar{\rho}(h)$, де $\bar{\rho}(h)$ – середнє значення густини на висоті h .

На рис. 2 показано висотні залежності відносних варіацій густини всередині джетів. У нижніх фотосферних шарах варіації густини у моменти, коли джет неактивний, незначні і переважно від'ємні, в верхніх шарах – додатні і збільшуються з висотою (через зменшення густини), інверсія густини відбувається на висотах 300–400 км, які суттєво відрізняються від аналогічних висот для спокійної фотосфери [12]. Під час активної фази $\Delta\rho(h)/\bar{\rho}(h)$ різко збільшується, внаслідок чого область інверсії густини джетів опускається в більш глибокі шари до 150–250 км (рис. 2). Крім того, самі висотні залежності варіацій густини в джетах, як і у випадку надлишкового тиску, відрізняються від таких для гранул і міжгранул. Згідно отриманих нами результатів, у верхніх фотосферних шарах всередині джетів густина істотно збільшена в порівнянні з густиною навколишнього середовища, а в нижніх шарах – несуттєво зменшена (на $\sim 5\%$). Вигляд висотних залежностей відносних варіацій густини свідчить про те, що досліджувані джети не

є результатом процесу конвективного колапсу. Вплив магнітного поля на висотну стратифікацію густини ми не враховували.

В розділі 4 “Особливості фотосферної конвекції в області сонячного факела” проведено тестування діагностичних можливостей спектральної лінії $\text{Ba II } \lambda 455.403 \text{ нм}$ шляхом розв’язання оберненої задачі нерівноважного переносу випромінювання в рамках гідродинамічної 3D-моделі Асплунда та ін. [18] для одного моменту часу [1]. Результати цього дослідження показали, що інверсні методи у застосуванні до цієї лінії є хорошим діагностичним інструментом при вивченні термодинамічної структури фотосфери і нижніх шарів хромосфери Сонця.

Наведено результати дослідження особливостей фотосферної конвекції на грануляційних масштабах в області факельної площадки. Для дослідження ми використали дані комплексних спостережень факельної площадки в центрі диска Сонця [29]: 1) дані спектрополяриметричних спостережень в інфрачервоній лінії заліза $\text{Fe I } \lambda 1564.8 \text{ нм}$ з використанням приладу TIP (часове розділення – 6 хв 50 с, спектральне розділення – $1.473 \times 10^{-3} \text{ нм}$; розмір пікселя – $0.185''$); 2) дані вузькосмугових фільтрових спостережень в 37 довжинах хвиль лінії іонізованого барію $\text{Ba II } \lambda 455.403 \text{ нм}$, отримані за допомогою приладу TESOS (часове розділення – 25.6 с, спектральне розділення – $1.6 \times 10^{-3} \text{ нм}$; розмір пікселя – $0.089''$). Фактичне просторове розділення, зумовлене нестабільністю земної атмосфери, становило $0.4 \dots 0.7''$. Для дослідження ми вибрали область факела з найбільшим значенням напруженості магнітного поля. Розмір цієї області становив $8.9'' \times 1.3''$, їй відповідає площадка 100×15 пікселів. Спектрополяриметричні та фільтрові дані були ототожені методом псевдоконтинууму [29].

Найвемпіричні моделі спостережуваної області було отримано шляхом розв’язання інверсної задачі нерівноважного переносу випромінювання в лінії іонізованого барію $\text{Ba II } \lambda 455.403 \text{ нм}$.

Оцінка магнітного поля зроблена за даними синхронних спектрополяриметричних спостережень в лінії $\text{Fe I } \lambda 1564.8 \text{ нм}$. Модель факела є сукупністю 1500 (100×15) одновимірних моделей, які пов’язані між собою спільною шкалою геометричних глибин, оскільки в нашому підході на нижній границі виконується горизонтальний баланс повного тиску.

Досліджено вплив магнітного поля на фотосферну конвекцію. Ми дослідили висотні залежності температурних варіацій та швидкостей для факельної площадки окремо для висхідних та низхідних потоків (рис. 3). Слабкі потоки, швидкість яких на нижній границі менша за

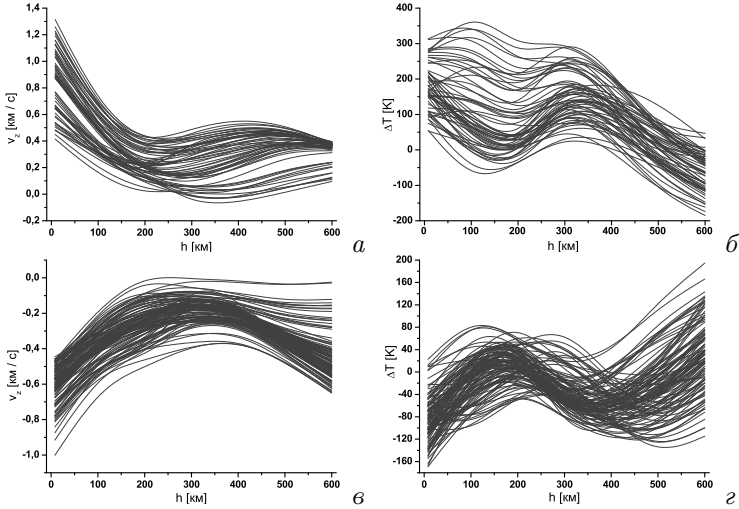


Рис. 3. Стратифікації швидкості та варіацій температури для висхідних (а, б) та низхідних (в, г) потоків.

0.4 км/с, ми не розглядали.

При русі плазми вгору (висхідні потоки в гранулах) в шарах $h \approx 200\text{--}400$ км швидкість руху речовини, на відміну від шарів незбуреної атмосфери, зростає. На цих же висотах зростають (в сторону додатних значень) температурні варіації, що призводить до виникнення другої температурної інверсії. Аналогічна особливість виникає при русі речовини вниз (низхідні потоки в міжгранулах) – на висотах $h \approx 200\text{--}500$ км низхідні потоки суттєво сповільнюються, а температура на тих же висотах $h \approx 300\text{--}500$ км понижується (на 100 К). Отже, в атмосферних шарах факела чітко проявляються дві області температурної інверсії – перша область: верхні шари нижньої та нижні шари середньої фотосфери, друга: шари верхньої фотосфери та нижньої хромосфери. Між цими двома областями інверсії існує область, де структура температурних варіацій нижньої фотосфери відновлюється. На нашу думку, такі особливості у стратифікаціях параметрів атмосфери для сонячного факела зумовлені, швидше за все, взаємним перетворенням магнітної енергії, з одного боку, та кінетичної і внутрішньої енергії замагніченої плазми, з іншого, тобто – дією дрібномасштабного динамо в фотосферних шарах атмосфери Сонця.

При аналізі поверхневого розподілу напруженості магнітного поля у

факельній площадці показано, що в областях факела з сильним магнітним полем (магнітна індукція більша за 1 кГс) усереднена по площадці температура шарів середньої фотосфери на декілька десятків градусів знижена, в області температурного мінімуму та нижньої хромосфери – суттєво підвищена. З іншого боку, в областях зі слабким магнітним полем (магнітна індукція менша за 1 кГс) усереднена по площадці температура шарів середньої фотосфери підвищена, а в верхній фотосфері та нижній хромосфері понижена. Отримані висновки узгоджуються з вище представленими даними для стратифікацій варіацій температури та z -проекції швидкості. Висотні залежності z -проекції швидкостей чітко вказують на переважання низхідних потоків в 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 [29].

Таким чином, інтегральна дія дрібномасштабного магнітного динамо проявляється у пониженні температури і сповільненні руху переважаючого низхідного потоку в шарах середньої фотосфери в областях факела з сильним полем (більше 1 кГс), тоді як в областях факела зі слабким полем (менше 1 кГс) має місце підвищення температури і прискорення руху переважаючого висхідного потоку в шарах середньої фотосфери.

Досліджено вплив магнітного поля факела на конvekцію у фотосферних шарах Сонця. За міру характеристики впливу магнітного поля на конvekцію було вибрано коефіцієнт кореляції відповідного параметра атмосфери на висоті $h = 0$ км з цим же параметром на висоті h . Було досліджено залежність від висоти коефіцієнта кореляції для вертикальної швидкості та варіацій температури. Через наявність магнітного поля коефіцієнт кореляції для вертикальної швидкості на висоті $h = 600$ км зменшується всього лиш до 0.7. Тобто, грануляційна структура факела у полі швидкостей завдяки магнітному полю зберігається до висот нижньої хромосфери. На висотах $h = 200 \dots 400$ км коефіцієнт кореляції для швидкості набуває мінімальних значень, що пов'язано із процесом взаємного перетворення магнітної та механічної енергії у цих шарах. 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 потоках, 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. Таким чином, в рамках кореляційного підходу було показано, що магнітне поле стабілізує фотосферну конвекцію в області факела, а дія дрібномасштабного магнітного динамо зумовлює у фотосферних шарах факела подвійну температурну інверсію. Виявлено, що грануляційна структура факела в полі швидкостей завдяки магнітному полю зберігається до висот нижньої хромосфери.

Розділ 5 “Динаміка та еволюція довгоживучих елементів сонячної грануляції” присвячений дослідженню фізичних умов, що призводять до процесів фрагментації та злиття гранул та, як наслідок, утворення довгоживучих конвективних структур у атмосфері Сонця. Для дослідження було використано дані 1D-спостережень у лінії Fe I λ 639.3 нм, які були отримані Н. Г. Щукіною на 70-см німецькому вакуумному баштовому телескопі VTT (Канарські острови, Іспанія). Спостережувана спокійна область знаходилась поблизу центра диска Сонця. Протяжність цієї області вздовж поверхні Сонця становила приблизно 64 Мм. Спостереження проводились протягом 2 год 36 хв з часовим розділенням 10 с.

Шляхом розв'язку інверсної задачі нерівноважного переносу випромінювання [16] ми відтворили варіації термодинамічних параметрів і вертикальних швидкостей сонячної фотосфери вздовж поверхні Сонця (координата X) та по висоті (координата h в межах від -25 км до 550 км згідно з моделлю спокійної атмосфери Сонця VAL-80 [41]). Їхній конвективний компонент виділено за допомогою фур'є-аналізу просторово-часової серії спостережних даних ($k - \omega$ фільтрації). Було проаналізовано розвиток вертикальних швидкостей V_{los} та варіацій тиску Δp . Часові зміни варіацій температури ΔT дають більш розмиту структуру сонячної грануляції, тому в цьому дослідженні ми їх не використовували.

За результатами відтворення у сонячній фотосфері разом з грануляційними потоками, середній час життя яких близький до 10 хв [31], знайдено висхідні потоки, які існують значно довше (до 1.5 год). За час спостереження у досліджуваній області ми виявили близько 70 довгоживучих висхідних потоків грануляції, які в процесі свого розвитку неодноразово поділяються на два чи більше потоків і, таким чином, формують дерева гранул, що фрагментуються.

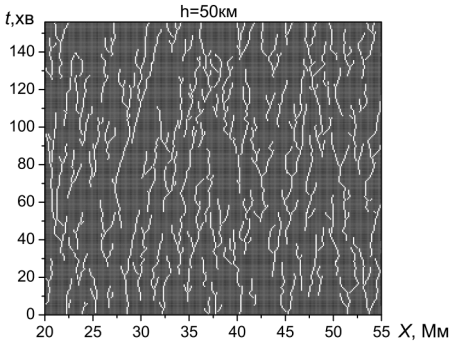


Рис. 4. Відтворені дерева гранул, що фрагментують, у нижній фотосфері ($h = 50$ км).

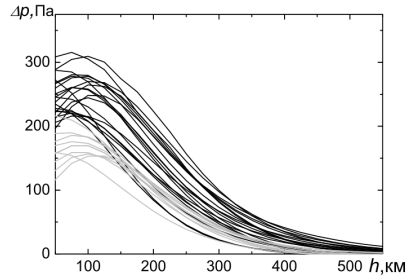


Рис. 5. Стратифікація варіацій тиску в гранулах, що розчиняються (сірі лінії), і в гранулах, що фрагментують (чорні лінії).

Для кращого виділення дерев гранул ми вибрали такі потоки, що фрагментуються принаймі один раз. Положення максимумів вертикальних швидкостей у цих потоках показано на рис. 4 білими лініями, а все інше – затемнено. Виявлено дерева гранул, у яких потоки відокремлюються до семи разів.

Виявлено структури грануляційних потоків, що живуть до 1.5 год і довше. Крива розподілу відтворених дерев гранул за часом життя різко асиметрична: максимум припадає на час життя 30 хв; приблизно 70% дерев гранул спостерігаються протягом 17...40 хв, а кількість дерев з більшим часом життя значно менша.

Досліджено просторово-часові зміни конвективних варіацій тиску. Стратифікацію варіацій тиску Δp у висхідних потоках грануляції показано на рис. 5: сірі лінії – варіації тиску всередині гранул, які в кінці свого розвитку розчиняються в навколишньому середовищі; чорні лінії – варіації тиску всередині гранул, що наприкінці поділяються на фрагменти. Виявлено, що в місцях фрагментації варіації тиску в 1.5–2 рази більші, ніж у гранулах, що розчиняються. З висотою варіації тиску у всіх грануляційних потоках суттєво зменшуються, але варіації в гранулах, що фрагментують, переважають.

Виявлено, що 67% областей з найбільшими додатними варіаціями тиску припадають на час і місце фрагментації грануляційних потоків,

і ще приблизно 12% таких областей відповідають моментам дотику “тілок” грануляційних дерев (зближення сусідніх структур).

Проведений аналіз варіацій тиску свідчить про те, що процес фрагментації грануляційних потоків пов’язаний з високими значеннями варіацій тиску в таких потоках. Наші результати узгоджуються з роботами [26, 31, 39] з моделювання загальних властивостей сонячної грануляції.

Додаток А містить список опублікованих праць за матеріалами роботи та відомості про апробацію результатів дисертаційного дослідження.

ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі представлено результати дослідження: фізичних умов у замагніченій плазмі атмосфери Сонця (у фотосферних джетах та в оточуючій атмосфері, в межах факельної площадки), впливу магнітного поля на конвекцію, дослідження динаміки та еволюції довгоживучих елементів сонячної грануляції. Основою роботи послужили дані спостережень центра диска Сонця з високим просторовим і часовим розділенням, отримані за допомогою телескопів VTT та SST. Шляхом розв’язку оберненої задачі нерівноважного переносу випромінювання відтворено поле вертикальних швидкостей і варіації термодинамічних параметрів (температури, тиску, густини). За допомогою модифікованого методу визначення напруженості магнітного поля було отримано просторовий розподіл напруженості в межах факельної ділянки. Було використано новий метод визначення поля горизонтальних швидкостей на грануляційних та субгрануляційних масштабах за даними 2D-спостережень в центрі диска Сонця. Результати проведених досліджень можуть бути узагальнені наступним чином:

1. Побудовано 3D гідродинамічні моделі фотосферних джетів. Виявлено збільшення температури та тиску всередині джетів, що дозволило зробити висновок про наявність джерел енерговиділення в шарах середньої фотосфери. Показано, що фотосферні джети можуть виникати в областях низхідної замагніченої плазми внаслідок магнітного перез’єднання при зіткненні двох горизонтальних конвективних потоків. Джети мають тенденцію виникати на краях магнітних концентрацій. Висотні залежності відносних варіацій густини вказують на те, що досліджувані джети не є результатом процесу конвективного колапсу.

2. За даними 2D-спостережень в лінії Ва II λ 455.403 нм шляхом розв'язання оберненої задачі нерівноважного переносу випромінювання отримано 3D-модель факельної площадки. Оцінка магнітного поля зроблена за даними синхронних спектрополяриметричних спостережень в лінії Fe I λ 1564.8 нм. Досліджено вплив магнітного поля на фотосферну конвекцію. За особливостями висотних залежностей швидкості та варіацій температури було виявлено прояви локального магнітного динамо у фотосферних шарах сонячного факела. Інтегральна дія дрібномасштабного магнітного динамо проявляється у пониженні температури і сповільненні руху переважаючого низхідного потоку в шарах середньої фотосфери в областях факела з сильним полем (більше 1 кГс), тоді як в областях факела зі слабким полем (менше 1 кГс) має місце підвищення температури і прискорення руху переважаючого висхідного потоку в шарах середньої фотосфери. В рамках кореляційного підходу показано, що магнітне поле стабілізує фотосферну конвекцію в області факела, а дрібномасштабне магнітне динамо зумовлює у фотосферних шарах факела подвійну температурну інверсію.
3. Отримано нові дані про вплив варіацій тиску на процес фрагментації грануляційних потоків: в точках розгалуження “тілок” грануляційних “дерев” виявлено збільшення варіацій тиску; показано, що у нижній фотосфері варіації тиску в гранулах, які фрагментуються, значно більші за варіації тиску в гранулах, які розчиняються у навколишньому середовищі.
4. Показано, що лінія Ва II λ 455.403 нм є надійним діагностичним інструментом при вивченні термодинамічної структури фотосфери і нижніх шарів хромосфери Сонця.
5. Запропоновано модифікацію класичного методу визначення модуля вектора напруженості магнітного поля за відстанню між спектральними положеннями піків V-профілю Стокса, яка полягає у використанні апроксимаційної кривої для всього профілю.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті, опубліковані у фахових реферованих виданнях

1. Стодилка М.И. Диагностика атмосферы Солнца инверсионным неЛТР-методом: линия Ва II λ 455.403 нм / Стодилка М.И., Присяжный А.И. // Кинематика и физика небесных тел. – 2016. – Т.32, №1. – С. 33–42.

2. Баран О.А. Структура довгоживучих елементів сонячної грануляції / Баран О.А., Стоділка М.І., Присяжний А.І. // Кинематика и физика небесных тел. – 2018. – Т.34, № 1. – С. 21–29.
3. Присяжний А.І. Стійкий метод визначення напруженості магнітного поля у фотосфері Сонця / Присяжний А.І., Стоділка М.І., Щукіна Н.Г. // Кинематика и физика небесных тел. – 2018. – Т.34, № 6. – С. 3–21.
4. Стоділка М.І. Діагностика фотосферних джетів спокійної атмосфери Сонця / Стоділка М.І., Сухоруков А.В., Присяжний А.І. // Кинематика и физика небесных тел. – 2019. – Т.35, № 5. – С. 48–84.
5. Стоділка М.І. Особливості конвекції в атмосферних шарах сонячного факела / Стоділка М.І., Присяжний А.І., Костик Р.І. // Кинематика и физика небесных тел. – 2019. – Т.35, № 6. – С. 18–33.

Публікації у матеріалах та тезах конференцій

6. Prysiaznyi A. Data processing of 2D spectral observations of the Sun / Prysiaznyi A. // 23th Young Scientists' Conference on Astronomy and Space Physics (YSC'23), April 25–30, 2016, Kyiv, Ukraine: Abstracts. – К.: ВПЦ “Київський університет”, 2016. – Р. 14.
7. Присяжний А. І. Спостережувана структура магнітного поля сонячного факела / Присяжний А.І., Стоділка М.І. // Програма та тези Восьмої наукової конференції “Вибрані питання астрономії та астрофізики”, присвяченої пам’яті Богдана Бабія (1936–1993), 17–20 жовтня 2016 р., Львів, ред. Б.Я. Мелех, М.В. Ваврух. – Львів: ВЦ Львівського національного університету імені Івана Франка, 2016. – С. 25.
8. Prysiaznyi A. Robust method for determination of solar magnetic field strength / Prysiaznyi A. // 24th Young Scientists' Conference on Astronomy and Space Physics (YSC'24), April 24–29, 2017, Kyiv, Ukraine: Abstracts. – К.: ВПЦ “Київський університет”, 2017. – Р. 13.
9. Prysiaznyi A. The influence of magnetic field on photospheric convection in solar facular region / Prysiaznyi A., Stodilka M. I. // 25th Young Scientists' Conference on Astronomy and Space Physics (YSC'25), April 23–28, 2018, Kyiv, Ukraine: Abstracts. – К.: ВПЦ “Київський університет”, 2018. – Р. 14.
10. Присяжний А. І. Дослідження енергетики фотосферної конвекції в області сонячного факела / Присяжний А. І. // Програма та тези Дев’ятої наукової конференції “Вибрані питання астрономії та астрофізики”, присвяченої пам’яті Богдана Бабія (1936–1993), 1–5 жовтня

- 2018 р., Львів, ред. Б.Я. Мелех, М.В. Ваврух. – Львів: ВЦ Львівського національного університету імені Івана Франка, 2018. – С. 82.
11. Prysiazhnyi A. The features of photospheric jets of the quiet solar atmosphere / Prysiazhnyi A. // 26th Young Scientists' Conference on Astronomy and Space Physics (YSC'26), April 22–27, 2019, Kyiv, Ukraine: Abstracts. – К.: ВПЦ “Київський університет”, 2019. – Р. 14.

СПИСОК ЦИТОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

12. Баран О.А. Структура фотосферної конвекції Сонця на грануляційних і мезогрануляційних масштабах / Баран О.А., Стоділка М.І. // Кинем. и физ. небесн. тел. – 2015. – Т.31, №2. – С. 21–33.
13. Гончарский А.В. Некорректные задачи астрофизики / Гончарский А.В., Черепашук А.М., Ягола А.Г. – М.: Наука, 1985. – 349 с.
14. Костык Р.И. Что такое солнечные факелы? / Костык Р.И. // Кинем. и физ. небесн. тел. – 2013. – Т.29, № 1. – С. 50–57.
15. Стоділка М.І. Диагностика поля горизонтальних скоростей в атмосфері Сонця: лінія Ва II λ 455.403 нм / Стоділка М.І. // Кинем. и физ. небесн. тел. – 2016. – Т.32, № 3. – С. 145–152.
16. Стоділка М.І. Інверсна задача для дослідження неоднорідностей атмосфери Сонця та зір / Стоділка М.І. // Журнал фізичних досліджень. – 2002. – Т.6, № 4. – С. 435–442.
17. Стоділка М.І. Тихонівські стабілізатори в інверсних задачах спектральних досліджень / Стоділка М.І. // Кинем. и физ. небесн. тел. – 2003. – Т.19, № 4. – С. 334–343.
18. Asplund M. The effects of numerical resolution on hydrodynamical surface convection simulations and spectral line formation / Asplund M., Ludwig H.G., Nordlund Å., Stein R.F. // Astron. Astrophys. – 2000. – V.359, N 2. – P. 669–681.
19. Auer L. Multidimensional radiative transfer with multilevel atoms: I. ALI metod with preconditioning of the rate equations / Auer L., Fabiani Bendicho P., Trujillo Bueno J. // Astron. Astrophys. – 1994. – V.292. – P. 599–615.
20. Berger T.E. Contrast Analysis of Solar Faculae and Magnetic Bright Points / Berger T.E., Rouppe van der Voort L., Löfdahl M. // Astrophys. J. – 2007. – V.661, Issue 2. – P. 1272–1288.
21. Borrero J. M. Supersonic magnetic upflows in granular cells observed with SUNRISE/IMAX / Borrero J.M., Martínez-Pillet V., Schlichenmaier R. et al. // Astrophys. J. Lett. – 2010. – V.723, Issue 2. – P. L144–L148.

22. Carlsson M. A computer program for solving multi-level non-LTE radiative transfer problems in moving or static atmospheres / Carlsson M. // *Phys. form. FeII lines outside LTE: IAU coll.94.* – 1988. – P. 273.
23. Chapman G.A. The photospheric network / Chapman G.A., Sheeley N.R.Jr. // *Solar Phys.* – 1968. – V.5, Issue 4. – P. 442–461.
24. Danilovic S. Simulated magnetic flows in the solar photosphere / Danilovic S., Cameron R.H., Solanki S.K. // *Astron. Astrophys.* – 2015. – V.574, id.A28. – 7 pp.
25. de la Cruz Rodríguez J. CRISPRED: A data pipeline for the CRISP imaging spectropolarimeter / de la Cruz Rodríguez J., Löfdahl M.S., Sütterlin P. et al. // *Astron. Astrophys.* – 2015. – V.573, A40. – P. 1–13.
26. Gadun A.S. Size-dependent properties of simulated 2-D solar granulation / Gadun A.S., Hanslmeier A., Pikalov K.N. et al. // *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* – 2000. – V.146. – P. 267–291.
27. Jafarzadeh S. Magnetic upflow events in the quiet-Sun photosphere. I. Observations / Jafarzadeh S., Rouppe van der Voort L., de la Cruz Rodriguez J. // *Astrophys. J.* – 2015. – V.810, Issue 1, id.54. – 12 pp.
28. Keller C.U. On the origin of solar faculae / Keller C.U., Schüssler M., Vögler A., Zakharov V. // *Astrophys. J.* – 2004. – V.607, Issue 1. – P. L59–L62.
29. Kostik R. Properties of convective motions in facular regions / Kostik R., Khomenko E.V. // *Astron. Astrophys.* – 2012. – V.545, id.A22. – 9 pp.
30. Martínez Pillet V. Ubiquitous quiet-Sun jets / Martínez Pillet V., Del Toro Iniesta J.C., Quintero Noda C. // *Astron. Astrophys.* – 2011. – V.530, id.A111. – 6 pp.
31. Nordlund Å. Solar surface convection / Nordlund Å., Stein R.F., Asplund M. // *Liv. Rev. Solar Phys.* – 2009. – V.6, Issue 1, id.2. – 117 pp.
32. Quintero Noda C. High speed magnetized flows in the quiet Sun / Quintero Noda C., Borrero J.M., Orozco Suárez D., Ruiz Cobo B. // *Astron. Astrophys.* – 2014. – V.569, id.A73. – 13 pp.
33. Rieutord M. Are granules good tracers of solar surface velocity fields? / Rieutord M., Roudier T., Ludwig H. -G. et al. // *Astron. Astrophys.* – 2001. – V.377. – P. L14–L17.
34. Rubio da Costa F. Centre-to-limb properties of small, photospheric quiet-Sun jets / Rubio da Costa F., Solanki S.K., Danilovic S. et al. // *Astron. Astrophys.* – 2015. – V.574, id.A95. – 8 pp.

35. Scharmer G.B. The 1-meter Swedish solar telescope / Scharmer G.B., Bjelsko K., Korhonen T.K. et al. // Innovative Telescopes and Instrumentation for Solar Astrophysics. Proceedings of the SPIE. – 2003. – V.4853. – P. 341–350.
36. Scharmer G. B. Accurate solutions to non-LTE problems using approximate Lambda operators / Scharmer G. B. // Methods in radiative transfer. – Cambridge and New York, Cambridge University Press. – 1984. – P. 173–210.
37. Scharmer G.B. CRISP spectropolarimetric imaging of penumbral fine structure / Scharmer G.B., Narayan G., Hillberg T. et al. // Astrophys. J. Lett. – 2008. – V.689, Issue 1. – P. L69–L72.
38. Socas-Navarro H. Non-LTE inversion of line profiles / Socas-Navarro H., Ruiz Cobo B., Trujillo Bueno J. // Astrophys. J. – 1998. – V.507, Issue 1. – P. 470–481.
39. Stein R.F. Simulation of solar granulation. I. General properties / Stein R.F., Nordlund Å. // Astrophys. J. – 1998. – V.499, Issue 2. – P. 914–933.
40. Title A.M. On the differences between plage and quiet Sun in the solar photosphere / Title A.M., Topka K.P., Tarbell T.D. et al. // Astrophys. J. – 1992. – V.393. – P. 782–794.
41. Vernazza J.E. Structure of the solar chromosphere. III - Models of the EUV brightness components of the quiet-Sun / Vernazza J.E., Avrett E.H., Loeser R. // Astrophys. J. Suppl. Ser. – 1981. – V.45. – P. 635–725.

АНОТАЦІЯ

Присяжний А. І. Фізичні умови у неоднорідній замагніченій фотосфері Сонця. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.03.03 – геліофізика і фізика Сонячної системи (10 – Природничі науки; 104 – Фізика та астрономія). – Львівський національний університет імені Івана Франка МОН України, Львів; Головна астрономічна обсерваторія НАН України, Київ, 2020.

Дисертація присвячена діагностиці фізичних умов у замагніченій плазмі атмосфери Сонця: у фотосферних джетах та в оточуючій атмосфері, а також у межах факельної площади; дослідженню впливу магнітного поля на конвекцію, дослідженню динаміки та еволюції довгоживучих елементів сонячної грануляції. Дослідження базується на

результатах спостережень, отриманих за допомогою телескопів VTT та SST (Канарські острови, Іспанія). Побудовано 3D-моделі неоднорідної фотосфери Сонця, в тому числі: джетів та факельної площадки; побудовано модель ділянки фотосфери, у якій присутні довгоживучі конвективні потоки.

Досліджено фізичні умови всередині та в околі фотосферних джетів, їх динаміку. Локалізовано центри енерговиділення. Вперше на базі нового підходу досліджено поле горизонтальних швидкостей в околі фотосферних джетів. Проаналізовано вплив магнітного поля на конвекцію. Встановлено висоти, на яких відбувається процес взаємного перетворення механічної та внутрішньої енергії фотосферної плазми в енергію магнітного поля. Досліджено динаміку та еволюцію довгоживучих елементів сонячної грануляції. Проаналізовано взаємозв'язок між просторово-часовими варіаціями термодинамічних параметрів і процесом фрагментації гранул.

Ключові слова: атмосфера Сонця, магнітні поля, фотосферні джети, сонячні факели, довгоживучі елементи сонячної грануляції.

ANNOTATION

Prysiazhnyi A. I. Physical conditions in the inhomogeneous magnetized photosphere of the Sun. – Qualification scientific work on the rights of a manuscript.

Candidate's thesis in Physics and Mathematics, speciality 01.03.03 – heliophysics and physics of Solar System (10 – Natural sciences; 104 – Physics and astronomy). – Ivan Franko National University of Lviv of Ministry of Education and Science of Ukraine, Lviv; Main Astronomical Observatory of National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, 2020.

The thesis is devoted to the diagnostics of physical conditions in a magnetized plasma of the solar atmosphere (in photospheric jets, in the surrounding atmosphere as well as within the facular region), the influence of magnetic field on convection, dynamics and evolution of long-lived elements of solar granulation. The work is based on observations of the center of the solar disk with high spatial and temporal resolution, obtained with the VTT and SST telescopes (Canary Islands, Spain).

From the data of 2D spectral observations of a quiet region of the solar disk center in the Fe I λ 557.609 nm line, 3D hydrodynamic models of photospheric jets are built by solving the inverse radiative transfer problem. The obtained models describe thermodynamic parameters and the complete velocity field (vertical and horizontal). An increase in the temperature and

pressure inside the jets was detected, which allowed us to conclude that there are sources of energy release in the layers of the middle photosphere. It is shown that photospheric jets can occur in regions of descending magnetized plasma due to magnetic reconnection when two horizontal convective flows collide. Jets tend to appear at the edges of magnetic field concentrations. Compared with the surrounding media, mass density in the jets is significantly increased in the upper layers and decreased in the lower layers of the photosphere. The height dependences of the relative density variations indicate that the investigated jets are not the result of a convective collapse process.

It is shown that the Ba II λ 455.403 nm spectral line provides a reliable diagnostic tool in the study of thermodynamic structure of the photosphere and the lower layers of the solar chromosphere. Based on the data of 2D-observations in the Ba II λ 455.403 nm line, a 3D-model of the facular region was obtained by solving the inverse nonequilibrium radiative transfer problem. The magnetic field was estimated from synchronous spectropolarimetric observations in the Fe I λ 1564.8 nm line. The influence of the magnetic field on photospheric convection is investigated. The manifestations of a local magnetic dynamo process in the photospheric layers of the solar facula were found from the features of the height dependences of the velocity and variations of temperature. The integral effect of a small-scale magnetic dynamo is manifested in lowering the temperature and slowing down the predominant downward flow in the layers of the middle photosphere in areas of the facula with a strong field (more than 1 kG), while in areas with a weak field (less than 1 kG), there is an increase in temperature and acceleration of the predominant upward flow in the layers of the middle photosphere. Within the framework of the correlation approach, it is shown that the magnetic field stabilizes photospheric convection in the facular region, and the small-scale magnetic dynamo causes double temperature inversion in the photospheric layers of the facula.

Long-lived structures, called “trees of fragmenting granules”, are formed as a result of the fragmentation of granular upflows, which can be repeated many times. From the data of 1D spectral observations of a quiet region of the solar disk center in the Fe I λ 639.3 nm line, we reproduced variations of thermodynamical parameters and vertical velocities in the solar photosphere by solving the inverse radiative transfer problem. New information on the influence of pressure variations on the process of fragmentation of granular flows are obtained: at the points of branching of granulation “trees” an increase of pressure variations is revealed; it is shown that in the lower photosphere the pressure variations in the fragmented granules are much

larger than the pressure variations in granules that dissolve in the environment. The performed analysis of pressure variations and the field of vertical velocities of solar photospheric convection confirmed the results of numerical simulations of solar granulation carried out by other authors.

A modification of the classical method for determining the absolute value of a magnetic field strength vector by the distance between the spectral positions of the peaks of the Stokes V profile is proposed. This method consists in using an approximation curve for the whole profile. The parameters of the best fitted approximation function were determined by multidimensional optimization. Following such an approach, the magnetic field strength can be found analytically using these parameters. Our modified method is more reliable in comparison with the classical one.

Key words: solar atmosphere, magnetic fields, photospheric jets, faculae, long-lived elements of solar granulation.