

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ГОЛОВНА АСТРОНОМІЧНА ОБСЕРВАТОРІЯ

БАРАН Олександра Андріївна

УДК 523.942

**СТРУКТУРА І ДИНАМІКА
ФОТОСФЕРНОЇ КОНВЕКЦІЇ СОНЦЯ
НА РІЗНИХ ПРОСТОРОВО-ЧАСОВИХ
МАСШТАБАХ**

01.03.03 – Геліофізика і фізика Сонячної системи

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Київ – 2016

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 сектору сонячної активності та
сонячно-земних зв'язків;

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

Захист відбудеться 1 квітня 2016 р. на засіданні Спеціалізованої вченої ради Д 26.208.01 при Головній астрономічній обсерваторії НАН України за адресою: 03680, 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: 03680, м. Київ, вул. Академіка Заболотного, 27, ГАО НАН України.

Автореферат розісланий “25” лютого 2016 р.

Учений секретар Спеціалізованої вченої ради
кандидат фізико-математичних наук



І.Е. Васильєва

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Просторово-часова природа неоднорідної сонячної атмосфери є складовою частиною однієї з фундаментальних проблем фізики Сонця – діагностики сонячної фотосфери.

Дослідження природи конвективних явищ у сонячній фотосфері на різних просторово-часових масштабах з використанням методів спектрального синтезу та інверсних методів складає основу цієї дисертаційної роботи.

Актуальність теми. Сонячна конвекція відіграє важливу роль у переносі енергії всередині Сонця і породжує неоднорідності на його поверхні. У сонячній фотосфері спостерігаються конвективні утворення на малих, середніх та великих просторово-часових масштабах – грануляція, мезогрануляція та супергрануляція. Фізичні процеси, що мають місце як в атмосфері Сонця, так і в підфотосферних шарах, можуть стати зрозумілішими завдяки детальному аналізу цих структурних утворень у фотосфері.

Дослідження реальної атмосфери Сонця передбачає визначення за даними спостережень термодинамічних і кінематичних параметрів, які описують фізичні умови в ній, і наступне відтворення фізичної картини процесів, які протікають у сонячній атмосфері.

На сьогодні залишаються не до кінця з'ясованими багато питань в області фотосферної конвекції:

- Відсутня єдина думка про стратифікацію термодинамічних параметрів та поле швидкостей фотосферної конвекції Сонця на різних просторово-часових масштабах: недостатньо вивчені висотні варіації тиску і густини в конвективних комірках, поле горизонтальних швидкостей у сонячній фотосфері, невирішеними залишаються питання про інверсію температурних варіацій та інверсію вертикальних швидкостей.
- Досі не встановлено, чи мезогрануляція є окремим видом конвективних рухів, а чи – частиною грануляційних масштабів, тому базові характеристики мезогранул і, взагалі, саме їх існування досі залишаються під питанням.
- Лише частково досліджено висотну залежність фізичних параметрів супергрануляції в сонячній атмосфері, вертикальну компоненту швидкостей всередині супергрануляційних комірок.
- Інтерпретація динаміки та еволюції конвективних потоків не цілком переконлива, що веде до розбіжностей з результатами спостережень.

Висока якість спостережуваних даних дає нові можливості для дослідження неоднорідної структури сонячної атмосфери. До сьогоднішнього дня існує проблема коректного відтворення фізичних умов у атмосфері Сонця. А тому застосування потужних, стійких методів діагностики сприяє кращому розумінню природи складних процесів, що відбуваються у сонячній атмосфері. До таких методів відносяться інверсні методи та методи спектрального синтезу. Наявність прецизійних спостережень і високочутливих методів обробки дозволяє виконати коректну, достовірну діагностику структури і динаміки реальної фотосферної конвекції Сонця.

Вищенаведені обставини визначили мету дисертації.

Зв'язок з науковими програмами, планами, темами. Робота виконувалась в Астрономічній обсерваторії Львівського національного університету імені Івана Франка в межах виконання держбюджетних тем:

- “Дослідження фізичних умов та коливних процесів в атмосфері Сонця” (номер державної реєстрації 0103U001905),
- “Дослідження динамічної неоднорідної структури сонячної атмосфери” (номер державної реєстрації 0106U001326),
- “Дослідження варіацій випромінювання Сонця в різних спектральних діапазонах та діагностика сонячної атмосфери” (номер державної реєстрації 0109U002089),
- “Дослідження сонячно-земних зв'язків: активні процеси на Сонці та їх геофізичні прояви” (номер державної реєстрації 0109U002608),
- “Геофізичні прояви особливостей епох екстремумів циклів сонячної активності” (номер державної реєстрації 0111U001093),
- “Структура і динаміка проникаючої конвекції та хвильових процесів в реальній атмосфері Сонця” (номер державної реєстрації 0113U003061),

в яких здобувач була виконавцем.

Мета та задачі дослідження. Основна мета цієї роботи – дослідити структуру та динаміку фотосферної конвекції у реальній атмосфері Сонця на різних просторово-часових масштабах, використавши дані спостережень з високим просторовим і часовим розділенням та застосувавши сучасні методи для обробки даних спостережень.

Для цього необхідно розв'язати наступні задачі:

- провести обробку даних високоякісного спостережуваного спектру Сонця; використовуючи інверсні методи та методи спектрального синтезу, відтворити просторово-часові варіації термодинамічних та кінематичних параметрів реальної сонячної фотосфери;
- виділити конвективну складову відтворених просторово-часових варіацій;
- отримати спектри потужності для параметрів фотосферної конвекції Сонця, виявити висотні зміни спектрів потужності для різних просторово-часових масштабів;
- побудувати напівемпіричні моделі фотосферної конвекції Сонця на грануляційних, мезогрануляційних і супергрануляційних масштабах;
- дослідити стратифікацію термодинамічних параметрів і поля швидкостей в окремих структурних елементах фотосферної конвекції;
- вивчити структуру поля горизонтальних швидкостей конвекції на різних просторово-часових масштабах у сонячній атмосфері (за спостереженнями на краю диска Сонця);
- порівняти особливості фотосферної конвекції на грануляційних, мезогрануляційних та супергрануляційних масштабах, уточнити природу мезогрануляції;
- дослідити динаміку та еволюцію конвективних потоків.

Об'єкт досліджень: атмосфера Сонця.

Предмет досліджень: конвективна структура реальної сонячної атмосфери на різних просторово-часових масштабах; просторові варіації термодинамічних та кінематичних параметрів фотосферної конвекції Сонця; динаміка та еволюція конвективних потоків.

Методи досліджень: пряма та обернена задача нерівноважного переносу випромінювання; метод λ -метра для відтворення горизонтальних швидкостей в атмосфері Сонця (на краю сонячного диска); багатовимірний фур'є-аналіз даних: $(k - \omega)$ -фільтрація для виділення конвективних рухів.

Наукова новизна одержаних результатів.

1. Побудована нова сітка моделей конвекції у реальній атмосфері Сонця на мезогрануляційних та супергрануляційних масштабах (за спостереженнями з високим просторовим і часовим розділенням).
2. Вперше досліджено стратифікацію поля швидкостей, варіацій температури, тиску та густини на різних просторово-часових масштабах. На мезогрануляційних масштабах виявлено інверсію температурних варіацій і вертикальних швидкостей та встановлено висоти,

на яких вона відбувається; уточнено висоти інверсії для грануляції. Виявлено додатні варіації тиску всередині висхідних потоків та від'ємні варіації тиску – у низхідних потоках. Встановлено висоти, на яких відбувається інверсія густини. На супергрануляційних масштабах вперше досліджено реальну структуру вертикальних швидкостей у фотосферних шарах.

3. Уточнено природу мезогрануляції: показано, що конвективна структура сонячної фотосфери (структура вертикальних швидкостей, варіацій температури, тиску та густини) на мезогрануляційних масштабах з висотою поводить подібно до грануляції, що вказує на приналежність мезоструктур до великих грануляційних масштабів. Встановлено, що на супергрануляційних масштабах стратифікація поля вертикальних швидкостей вказує на суттєву відмінність супергрануляції від конвективних утворень менших масштабів – структура швидкостей супергрануляції не змінюється у фотосферних шарах.
4. Отримано нові дані про поле горизонтальних швидкостей сонячної конвекції на різних просторово-часових масштабах у сонячній фотосфері та в області температурного мінімуму і на початку нижньої хромосфери: досліджено стратифікацію горизонтальних швидкостей на мезогрануляційних та супергрануляційних масштабах, виявлено асиметричний розподіл горизонтальних швидкостей, тонку структуру горизонтальних потоків на досліджуваних масштабах.
5. Проведено ретельне дослідження часових змін варіацій термодинамічних і кінематичних параметрів всередині грануляційних комірок, що уможливило точніше відслідкувати еволюцію висхідних і низхідних конвективних потоків та особливості формування і розпаду конвективних комірок, виявити відмінності в розвитку малих і великих гранул.

Практичне значення одержаних результатів. Результати відтворення неоднорідностей сонячної атмосфери та їх динаміки на різних просторово-часових масштабах мають теоретичне і практичне застосування. Вони є носіями інформації про структуру і динаміку фотосфери, де ці явища спостерігаються, а також про глибокі непрозорі шари, в яких вони зароджуються.

Дослідження фотосферної конвекції сприяє кращому розумінню фізики складної взаємодії термодинамічних збурень у сонячній атмосфері. Результати таких досліджень застосовують при відтворенні фізичних умов у реальній атмосфері Сонця, а також при прогнозуванні сонячної активності. Вивчення фотосферних конвективних явищ також

дає можливість досягнути складну динаміку конвективних рухів, що мають місце під фотосферою, де спостереження спектральними методами недоступні.

Результати діагностики сонячної атмосфери можна використовувати для тестування теоретичних моделей сонячної і зоряної конвекції та фізичних процесів у них, для з'ясування деяких особливостей еволюції Сонця і зір.

Особистий внесок здобувача. Всі результати, викладені в дисертації, отримано здобувачем або самостійно, або при її безпосередній участі. Зокрема, роботи [2, 3, 5, 8] виконані здобувачем без співавторів.

У роботі [1] автор брала участь в опрацюванні спостережуваного матеріалу та проведенні розрахунків, аналізувала результати досліджень і писала текст статті.

У роботі [4, 6, 9] здобувач приймала активну участь в обговоренні постановки наукових завдань та виборі методик розрахунків, проводила аналіз одержаних результатів досліджень, брала участь у формулюванні висновків, писала тексти статей.

У роботі [7] автор поставила наукову задачу, приймала безпосередню участь в обробці даних і порівнянні отриманих результатів зі спостереженнями, а також у формулюванні висновків та написанні статті.

Апробація результатів досліджень. Результати, отримані в межах цієї дисертаційної роботи, доповідались та обговорювались на таких наукових конференціях та семінарах:

- V, VI, VII Міжнародних наукових конференціях “Вибрані питання астрономії та астрофізики”, присвячених пам’яті Б.Т. Бабія (м. Львів, 2008, 2011, 2014 pp.);
- Young Scientists’ Conferences on Astronomy and Space Physics (YSC’16, YSC’17, YSC’18, YSC’19, YSC’20, YSC’21) (м. Київ, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014 pp.);
- Міжнародних конференціях з фізики Сонця у Кримській астрофізичній обсерваторії (смт. Наукове, Крим, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013 pp.);
- Міжнародних конференціях з астрономії та фізики космосу в Київському національному університеті (м. Київ, 2012, 2014 pp.);
- Third UK-Ukraine-Spain Meeting on Solar Physics and Space Science (м. Львів, 2015 p.);
- астрофізичних семінарах Астрономічної обсерваторії Львівського національного університету імені Івана Франка;

— астрофізичному семінарі Головної астрономічної обсерваторії НАН України.

Публікації. Основні результати дисертаційного дослідження були опубліковані в 9 статтях у фахових журналах [1–9], 2 статтях в працях міжнародних конференцій [10–11] та у 17 збірниках тез конференцій [12–28].

Структура та обсяг дисертації. Робота складається з переліку умовних позначень, вступу, 6 розділів, висновків до розділів, загальних висновків, списку використаних джерел. Повний обсяг дисертації становить 140 сторінок. Текст роботи містить 41 рисунок, 230 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.

В **розділі 1 "Сучасний стан проблеми діагностики конвекції в атмосфері Сонця"** представлено широкий і детальний перелік ранніх та сучасних праць з дослідження конвективних рухів в атмосфері Сонця на різних просторово-часових масштабах, враховуючи спостереження, теоретичні роботи та числове моделювання сонячної конвекції. Проаналізовано основні здобутки у вивченні структури і динаміки грануляції та супергрануляції, спроби виділення і дослідження конвекції мезогрануляційних масштабів, зазначено недоліки та обґрунтовано потребу в подальших дослідженнях сонячної конвекції.

Більшість ранніх робіт присвячена дослідженню структури та морфології конвекції в атмосфері Сонця. На спокійній сонячній поверхні найбільш видимим фотосферним явищем є грануляція. При дослідженні структури сонячної конвекції на грануляційних масштабах ($\lambda \approx 0.5\text{--}2.0$ Мм, $t \approx 5\text{--}16$ хв) аналізуються переважно спостережувані флуктуації інтенсивності та конвективних швидкостей [29–34]: частково досліджено висотну стратифікацію фізичних параметрів фотосферної конвекції на грануляційних масштабах, знайдено температурну інверсію,

досліджено розподіли температурних варіацій і вертикальних швидкостей та їх зміщення всередині грануляційних комірок, виявлено тонку структуру вертикальних потоків; певна кількість робіт присвячена еволюції грануляційних комірок [35, 36]; останнім часом з'являються роботи з вивчення впливу магнітних полів на грануляційну структуру [37, 38]. Однак залишається відкритим питання про інверсію швидкостей та ведеться дискусія про висоти, на яких відбувається інверсія температурних варіацій; недостатньо досліджено висоти проникнення грануляційних потоків у верхні шари; менш дослідженим залишається поле горизонтальних швидкостей грануляції.

З часу проведення перших праць з конвекції проміжних масштабів на Сонці [39], велика кількість спостережень виявляє в сонячній атмосфері структури, які приписують явищу мезогрануляції на масштабах $\lambda \approx 5\text{--}12$ Мм, $t \approx 1\text{--}5$ год. Параметри фотосферної структури на цих масштабах варіюють між грануляцією і супергрануляцією, таким чином, тривалий час ведеться дискусія про відмінність мезогрануляції від конвекції інших масштабів [40–42]. Такі суперечливі результати з виявлення мезогрануляції як окремого виду конвекції вимагають подальших досліджень з визначення просторово-часових варіацій температури, швидкості, тиску, магнітного поля на цих проміжних масштабах.

Опубліковано ряд робіт з дослідження конвективних рухів на супергрануляційних масштабах ($\lambda \approx 20\text{--}40$ Мм, $t \approx 1$ доба) [43–45]: вивчались горизонтальні потоки супергрануляції, однак лише частково досліджено висотну залежність фізичних параметрів супергрануляційного потоку, вертикальну компоненту швидкостей всередині таких комірок, зв'язки супергрануляції з магнітними полями, що важливо для встановлення їх ролі у формуванні великих масштабів конвекції.

Тривалий час конвективні структури різних масштабів у сонячній фотосфері, що відповідають грануляції, мезо- і супергрануляції, досліджували в більшості випадків окремо. Останніми роками сонячну конвекцію почали розглядати як сукупність взаємодіючих і взаємопов'язаних структур різних масштабів. Багато робіт присвячено вивченню великих грануляційних скупчень – накладання менших (грануляційних) конвективних потоків на більші (мезогрануляційні та супергрануляційні) потоки [36, 46].

Отже, незважаючи на тривале дослідження сонячної конвекції, характер конвективних рухів ще до кінця не вивчений. Таким чином, дослідження варіацій фізичних параметрів сонячної конвекції за результатами сучасних спостережень з високим просторово-часовим розділенням залишається актуальним.

У розділі 2 "Спостережувані дані та методика розрахунку профілів фраунгоферових ліній" описано спостережуваний матеріал, отриманий на 70-см німецькому вакуумному баштовому телескопі VTT (Канарські острови, Іспанія) у спокійних ділянках сонячного диска з високим просторовим та часовим розділенням [47]. Це – фотосферні лінії нейтрального заліза FeI $\lambda 523.4$ нм і FeI $\lambda 639.3$ нм, отримані поблизу центра диска Сонця, та лінія FeI $\lambda 532.4$ нм, отримана на його краю. Тривалість спостережень першої лінії – 31 хв, другої лінії – 2 год 36 хв; протяжність області вздовж поверхні Сонця в обох спостереженнях становить приблизно 64 Мм. Спостереження третьої лінії проведено протягом 4 хв на краю сонячного диска ($\mu = \cos\theta = 0-0.37$) для області протяжністю приблизно 49 Мм, з врахуванням сферичності поверхні – це область довжиною близько 263 Мм. Глибина утворення континууму відповідає висотам нижньої та середньої фотосфери, ядро спостережуваної лінії формується в області температурного мінімуму та на початку нижньої хромосфери.

Викладено теоретичні основи розв'язку оберненої задачі переносу випромінювання, що зводиться до визначення стратифікації термодинамічних та кінематичних параметрів з умови найкращого узгодження теоретичних профілів ліній з результатами спостережень [48]. Вивчення фізичних характеристик сонячних неоднорідностей ґрунтується на аналізі спостережуваного спектру, що описується рівнянням переносу випромінювання:

$$\frac{dI_\nu(\mathbf{r}, \mathbf{e})}{d\tau_\nu} = I_\nu(\mathbf{r}, \mathbf{e}) - S_\nu(\mathbf{r}).$$

У випадку відхилення від локальної термодинамічної рівноваги (не-ЛТР випадку) це рівняння вноситься в рівняння статистичної рівноваги; для вдосконалення обчислювального процесу було використано метод прискореної Λ -ітерації (ALI), методику прискорення збіжності (Ng-методику), було застосовано множинні сітки для фільтрації довгоперіодичних осциляцій [49].

Розв'язок оберненої задачі знайдено методом послідовних наближень [50]: на основі використовуваної моделі атмосфери було розраховано теоретичні профілі ліній, за якими визначено поправки до параметрів моделі. Чутливість профілів ліній до варіацій відповідних параметрів моделі описують функції відгуку. Для оцінки узгодженості профілів було використано цільову функцію:

$$\chi^2 = \frac{1}{\nu} \sum_{i=1}^M (I_i^{obs.} - \tilde{I}_{1,i})^2 / \sigma_i^2 + \alpha T_s(x),$$

де ν – число ступенів вільності, σ_i – деякі вагові множники, які характеризують похибки вимірювань, α – параметр регуляризації, x – безрозмірний параметр моделі, $T_s(x)$ – стабілізатор Тихонова, що усуває осциляції розв'язків і дозволяє проводити не-ЛТР дослідження [51].

Таким чином, за профілями ліній FeI $\lambda 523.4$ нм і FeI $\lambda 639.3$ нм шляхом описаної вище методики було відтворено просторово-часові варіації вертикальних швидкостей, температури, тиску та густини в реальній фотосфері Сонця.

Далі описано обробку даних спостережень на краю диска Сонця в лінії FeI $\lambda 532.4$ нм. Для відтворення поля горизонтальних швидкостей руху речовини в цій області застосовувався метод λ -метра, який полягає у визначенні поля атмосферних швидкостей з асиметрії профілів спостережуваних ліній [47]. Для кожного профілю було побудовано бісектор, форма якого відображає променеву швидкість на різних глибинах утворення лінії.

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 "Побудова спектрів потужності конвективних рухів за спостереженнями в центрі диска Сонця" приводяться результати досліджень енергетики сонячної конвекції. За відтвореними інверсною процедурою просторово-часовими варіаціями температури та вертикальних швидкостей у фотосфері Сонця побудовано спектри потужності (з 2D-корекцією) конвективних рухів. Також ми побудували відповідні спектри потужності для рухів з періодом $T > 20$ хв (довгоперіодичні варіації – виключено грануляцію з малим і середнім часом життя, що, в свою чергу, дає можливість краще дослідити більші часові масштаби (мезогрануляційні та супергрануляційні)) та спектри потужності для рухів з періодом $T < 10$ хв (короткоперіодичні варіації – для виділення грануляції з малим часом життя). Спектри потужності вертикальних швидкостей для довгоперіодичних варіацій сонячної конвекції показано на рис. 1.

Проаналізовано спектри потужності варіацій температури та вертикальних швидкостей конвективних рухів на різних висотах у фотосфері Сонця: для досліджуваних висот потужність конвективних рухів максимальна на грануляційних масштабах $\lambda \approx 1.3\text{--}3.5$ Мм і з висотою

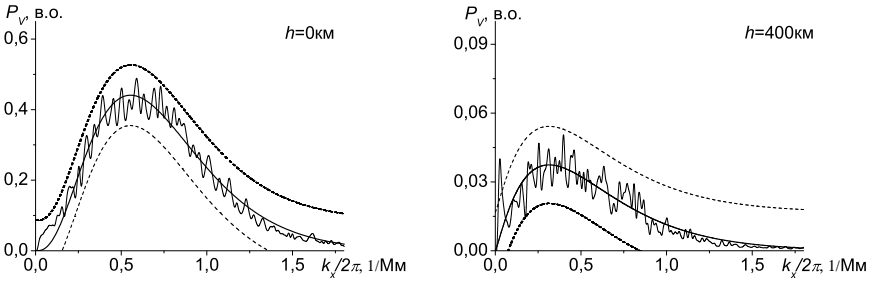


Рис. 1. Спектри потужності вертикальних швидкостей для конвективних рухів з періодом $T > 20$ хв у сонячній фотосфері на висотах 0 км і 400 км; межі області 3σ позначені штриховими лініями.

зменшується.

Прослідковано зміщення максимуму потужності конвективних рухів на спектрах для верхніх шарів фотосфери відносно відповідних спектрів у нижній фотосфері: максимуми спектрів зміщуються в бік дещо більших грануляційних масштабів; для довгоперіодичних варіацій ці зміщення найбільші та становлять $\Delta\lambda \approx 1$ Мм на висоті $h = 400$ км стосовно до такого самого максимуму потужності на $h = 0$ км.

Виявляється, що частина спектру потужності варіацій вертикальних швидкостей, яка відповідає великим масштабам $\lambda > 12$ Мм, залишається практично незмінною на всіх досліджуваних висотах (і краще проявляється на спектрах для довгоперіодичних варіацій). Цим масштабам відповідають супергрануляційні потоки, які зберігаються при проникненні у верхні шари фотосфери. На спектрі потужності температурних варіацій супергрануляція подібним чином не проявляється.

Аналіз спектрів потужності варіацій температури і вертикальних швидкостей конвективних рухів на різних висотах у фотосфері Сонця дозволив відокремити різні масштаби конвекції: грануляційні та супергрануляційні масштаби досить чітко розділені на спектрах потужності вертикальних швидкостей у верхніх шарах фотосфери. Проте немає видимих проявів особливої поведінки тієї частини спектру, що б відповідала мезогрануляції, оскільки на масштабах $\lambda < 12$ Мм (мезогрануляційні та грануляційні масштаби) спектри потужності варіацій температури і вертикальних швидкостей з висотою зазнають аналогічних змін.

Розділ 4 "Моделі спостережуваної конвекції на різних просторово-часових масштабах" присвячений дослідженню структури реальної фотосферної конвекції. Побудовано сітку моделей неоднорідної фотосфери Сонця на різних просторово-часових масштабах. Для цього методом фільтрації просторових і часових частот ми виділили варіації в межах грануляційних ($\lambda = 0.5\text{--}5.0$ Мм, $\Delta t = 3\text{--}20$ хв) та мезогрануляційних масштабів ($\lambda = 5\text{--}12$ Мм, $\Delta t > 20$ хв (час життя мезогрануляційних комірок обмежений тривалістю спостережень 2.6 год)) згідно з роботами [39, 43, 52]. Поле вертикальних швидкостей і температурні варіації на мезогрануляційних масштабах показано на рис. 2.

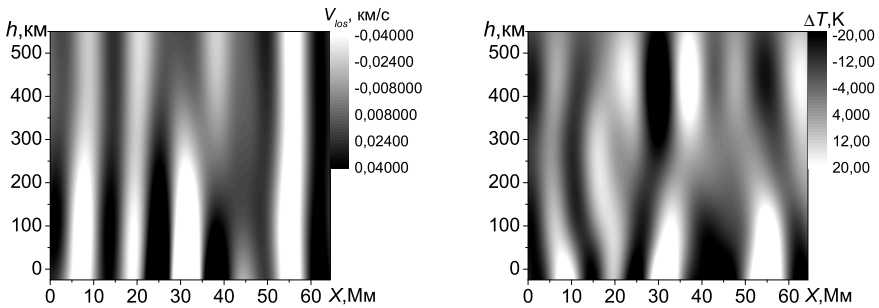


Рис. 2. Поле вертикальних швидкостей (ліворуч) і температурні варіації (праворуч) на мезогрануляційних масштабах.

В досліджуваній області було виділено та проаналізовано понад 1500 конвективних комірок на грануляційних масштабах (гранул і міжгранул), а також близько 40 конвективних потоків на мезогрануляційних масштабах (висхідних і низхідних потоків). Отримані вертикальні швидкості V , варіації температури ΔT , відносні варіації тиску $\Delta p/\bar{p}$ і відносні варіації густини $\Delta \rho/\bar{\rho}$ (\bar{p} , $\bar{\rho}$ – середні значення тиску та густини на відповідних висотах отриманої моделі) у висхідних комірках грануляції приведено на рис. 3.

На грануляційних масштабах виявлено, що: грануляційні потоки проникають до висот $h = 500$ км і вище, на висотах $h \approx 200$ км в процесі розвитку потоку може змінюватись напрямок руху (частка конвективних комірок з інверсією швидкості складає 12%); температурні варіації зменшуються з висотою, на $h \approx 210$ км майже завжди відбувається температурна інверсія (проявляється у гранулах і в міжгранулах

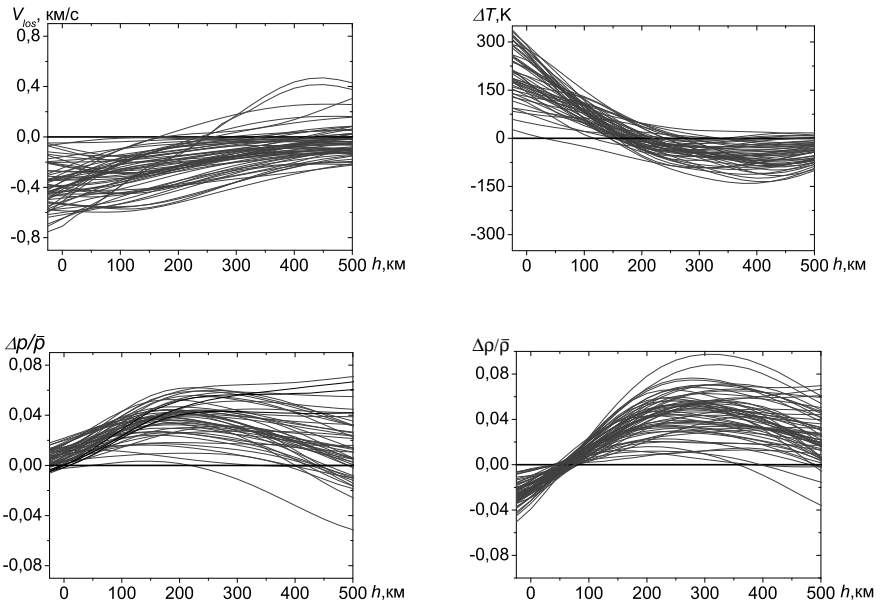


Рис. 3. Стратифікація вертикальних швидкостей V , температурних варіацій ΔT , відносних варіацій тиску $\Delta p/\bar{p}$ і відносних варіацій густини $\Delta \rho/\bar{\rho}$ у висхідних потоках грануляції.

під час еволюції), у верхніх шарах фотосфери температурна структура грануляції відновлюється лише частково; варіації температури і конвективних швидкостей на грануляційних масштабах корелюють максимально в нижній фотосфері, у вищих шарах фотосфери кореляція на цих масштабах зменшується; варіації тиску зазвичай додатні в гранулах та від'ємні у міжгранулах; у нижній фотосфері (на $h = 0$ км) варіації густини від'ємні у гранулах і додатні в міжгранулах, на висоті $h \approx 75$ км відбувається інверсія густини, вище ці варіації стають додатними у гранулах і від'ємними у міжгранулах.

На мезогрануляційних масштабах конвективні комірки проникають до висот температурного мінімуму, у верхніх шарах фотосфери знайдено випадки зміни напрямку руху мезогрануляційного потоку в процесі його розвитку; температурні варіації з висотою зменшуються, температурна інверсія на цих масштабах відбувається на висотах $h \approx 245$ км,

у верхніх шарах фотосфери температурна структура мезогрануляції частково відновлюється; варіації температури та конвективних швидкостей на мезогрануляційних масштабах корелюють максимально в нижній фотосфері, у верхніх шарах фотосфери коефіцієнт кореляції на цих масштабах міняє знак і набуває суттєво менших значень; варіації тиску набувають здебільшого додатних значень у висхідних мезогрануляційних потоках і від'ємних – у низхідних потоках; у нижній фотосфері (на $h = 0$ км) варіації густини від'ємні у висхідних потоках мезогрануляції та додатні – у низхідних потоках, вони зазнають інверсії на висоті $h \approx 85$ км і вище цього рівня – збільшуються з протилежним знаком.

Для виділення конвективних рухів на супергрануляційних масштабах ($\lambda = 20\text{--}40$ Мм) ми відфільтрували рухи з горизонтальними швидкостями, більшими за 0.5 км/с, з подальшим усередненням їх за час спостереження 2.6 год (згідно з роботою [43]). В результаті отримано усереднене в часі поле вертикальних швидкостей на супергрануляційних масштабах. Виявлено, що потоки супергрануляції проходять через всю фотосферу до висот температурного мінімуму і, вочевидь, сягають вище; відповідна кореляція залишається високою вздовж всіх досліджуваних висот – структура швидкостей супергрануляції добре зберігається у всіх шарах фотосфери.

На основі аналізу просторово-часових варіацій температури, вертикальних швидкостей, густини і тиску показано, що конвективна структура сонячної фотосфери на мезогрануляційних масштабах з висотою веде себе подібно до грануляції, а тому можна вважати, що мезоструктури є частиною великих грануляційних масштабів: мезогранули – це великі довгоживучі гранули або їх комплекси. Стратифікація поля вертикальних швидкостей вказує на суттєву відмінність супергрануляції від конвективних утворень менших масштабів.

Мета розділу 5 "Відтворення структури горизонтальних швидкостей у сонячній атмосфері за спостереженнями на краю диска Сонця" – дослідити структуру горизонтальних швидкостей у сонячній атмосфері на різних просторово-часових масштабах. Для цього ми використовуємо VTT-дані спостережень лінії FeI $\lambda 532.4$ нм, отримані на краю диска Сонця.

Приведено результати дослідження бісекторів спостережуваної лінії: у верхній частині бісекторів виявлено найбільший вигин у бік коротких хвиль; при наближенні до краю сонячного диска це відхилення залишається суттєвим і асиметрія істотно посилюється в центральній

частині бісекторів. Асиметрія спостережуваної лінії спричинена рухами речовини на досліджуваних висотах – у фотосферних шарах і в області температурного мінімуму та на початку нижньої хромосфери.

Відтворено (методом λ -метра) швидкості руху речовини на всій спостережуваній ділянці Сонця. Вони в більшій чи меншій мірі визначаються вкладом як горизонтальної, так і вертикальної компонент. При наближенні до лімба вклад вертикальної компоненти суттєво зменшується, а отже, отримані швидкості відображають розподіл горизонтальних рухів в області дослідження.

Просторова роздільна здатність на краю диска Сонця недостатня для виділення грануляційних масштабів в цій області, тому ми досліджували поле швидкостей на мезогрануляційних та супергрануляційних масштабах (рис. 4).

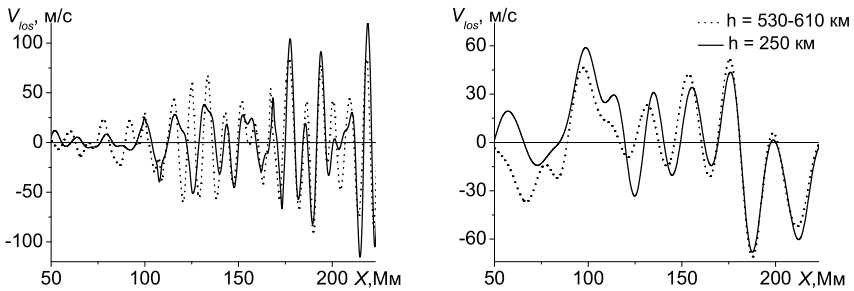


Рис. 4. Променеві швидкості на краю диска Сонця на мезогрануляційних масштабах (ліворуч) і супергрануляційних масштабах (праворуч) на різних висотах у сонячній атмосфері.

На мезогрануляційних масштабах виявлено збільшення горизонтальних швидкостей з висотою. Показано, що в області температурного мінімуму та на початку нижньої хромосфери ($h = 530-610$ км) суттєво міняється структура горизонтальних потоків на цих масштабах – відбуваються зміщення потоків стосовно до їх положення в шарах середньої фотосфери ($h = 250$ км); проявляється тонка структура потоків у полі горизонтальних швидкостей; при наближенні до центра диска збільшується вклад вертикальної компоненти з більшими значеннями швидкостей у нижніх шарах.

Досліджено поле швидкостей супергрануляції: по всій досліджуваній області (на краю диска, де переважає горизонтальна компонента

швидкості, і ближче до центра, де збільшується вклад вертикальної компоненти) амплітуда швидкостей слабо міняється з висотою. Показано, що структура поля вертикальних швидкостей супергрануляції практично не змінюється у фотосферних шарах, чого не можна сказати про горизонтальні швидкості – в шарах температурного мінімуму та на початку нижньої хромосфери ($h = 530\text{--}610$ км) структура горизонтальних швидкостей зазнає змін щодо структури в шарах середньої фотосфери ($h = 250$ км), а саме: з висотою спостерігаються зміщення потоків, відбувається зміна їх тонкої структури.

У розділі 6 "**Динаміка та еволюція спостережуваних конвективних потоків**" за отриманими моделями фотосферної конвекції ми провели дослідження динаміки та еволюції спостережуваних конвективних потоків. Для цього проаналізовано, як міняється стратифікація вертикальних швидкостей і температурних варіацій всередині висхідних та низхідних потоків фотосферної конвекції на різних стадіях еволюції. Отримані результати свідчать про те, що висхідні потоки виникають у підфотосферних шарах і поширюються у верхні шари фотосфери; низхідні потоки зароджуються вздовж всієї фотосфери: здебільшого спочатку вони проявляються у верхній та середній фотосфері, а потім область збурення опускається вниз. Загасання потоків у обох випадках починається зверху, в нижніх шарах фотосфери варіації температури та швидкості зменшуються повільніше.

Досліджено, як змінюються з часом вертикальні швидкості та температурні варіації всередині різних за розміром грануляційних комірок. Виявлено, що утворення та розпад гранул відбуваються різними шляхами в залежності від їх розміру. Зміни варіацій, які найчастіше спостерігаються всередині конвективних комірок при їх розпаді, представлені на рис. 5.

Знайдено, що малі комірки (з розмірами до 1.5 Мм) зазвичай виникають із залишку попередньої грануляційної комірки або появляються спонтанно в міжгрануляційному середовищі, де з часом формується структура з максимальними варіаціями температури і вертикальних швидкостей у центральній частині комірки; наприкінці розвитку варіації всередині комірки зменшуються до мінімальних значень і, можливо, дають початок новій гранулі, або ж комірка повністю розчиняється в навколишньому середовищі (рис. 5, *a*).

Великі гранули (з розмірами більше 1.5 Мм) формуються з одного або, частіше, з декількох малих залишків шляхом їх об'єднання в одну велику конвективну структуру з асиметричним розподілом варі-

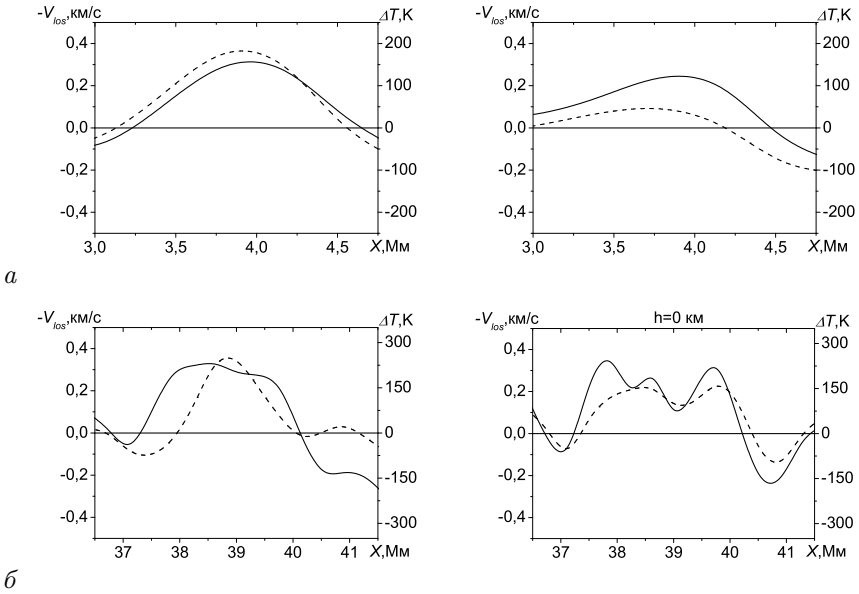


Рис. 5. Розпад малих (а) і великих (б) гранул, представлений змінами вертикальних швидкостей (суцільна лінія) та варіацій температури (штрих) всередині комірок на висотах $h = 0 \text{ км}$ за час $\Delta t \approx 6 \text{ хв } 16 \text{ с}$.

ацій всередині, наприкінці свого розвитку такі структури, як правило, поділяються на декілька фрагментів (рис. 5, б). У цьому випадку фрагментація може повторюватися, і, таким чином, формуються просторово-часові структури з розмірами приблизно 4 Мм і більше – т. зв. “дерева”, відгалуженнями яких є фрагменти з розпаду великої гранули, що теж ймовірно фрагментують [36, 46].

ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі представлено результати дослідження структури та динаміки реальної конвекції в сонячній фотосфері на різних просторово-часових масштабах. Основою роботи послужили дані спостережень на VTT, які проводились в центрі та на краю диска Сонця з високим просторовим і часовим розділенням. Шляхом розв’язку оберненої задачі нерівноважного переносу випромінювання відтворено поле вертикальних швидкостей і варіації термодинамічних параметрів (тем-

ператури, тиску, густини) в фотосферних шарах. З допомогою $(k - \omega)$ -фільтрації виділено конвективну компоненту варіацій. На основі даних на краю диска Сонця методом λ -метра відтворено поле горизонтальних швидкостей в атмосфері Сонця. Результати проведених досліджень можуть бути узагальнені наступним чином:

1. Вивчено енергетику конвективних рухів у фотосфері Сонця. На спектрах потужності вертикальних швидкостей виявлено, що в фотосферних шарах супергрануляційні масштаби розділені від менших масштабів; мезогрануляційні масштаби не проявляються.
2. Побудовано сітку моделей неоднорідної фотосфери Сонця на грануляційних (0.5–5.0 Мм), мезогрануляційних (5–12 Мм) та супергрануляційних (20–40 Мм) масштабах.
3. Досліджено стратифікацію вертикальних швидкостей і варіацій термодинамічних параметрів (температури, тиску, густини) на грануляційних та мезогрануляційних масштабах. Показано, що конвективна структура фотосфери на цих масштабах подібна: в обох випадках виявлено максимальну кореляцію варіацій температури і конвективних швидкостей у нижній фотосфері, температурну інверсію та інверсію вертикальних швидкостей у шарах середньої фотосфери ($h \approx 200$ км); варіації тиску здебільшого додатні у висхідних потоках і від'ємні – у низхідних; виявлено інверсію густини на границі між нижньою і середньою фотосферами ($h \approx 80$ км). Проведений аналіз варіацій вказує на те, що мезоструктури представляють грануляцію на великих масштабах.
4. Стратифікація поля вертикальних швидкостей вказує на суттєву відмінність супергрануляції від конвективних утворень менших (грануляційних) масштабів: у фотосферних шарах поле вертикальних швидкостей на супергрануляційних масштабах майже не міняється – супергрануляційні потоки проходять через всю фотосферу до висот температурного мінімуму і, вочевидь, вище.
5. За даними спостережень на краю сонячного диска вивчено поле горизонтальних швидкостей конвективних рухів на висотах $h = 250$ км (фотосфера) та $h \approx 530$ –610 км (область температурного мінімуму та початок нижньої хромосфери): на мезогрануляційних масштабах горизонтальні швидкості з висотою зростають; на супергрануляційних масштабах амплітуда горизонтальних швидкостей слабо міняється з висотою; на всіх досліджуваних масштабах виявлено зміщення потоків у області температурного мінімуму та на початку нижньої хромосфери по відношенню до їх положення в фотосферних шарах,

проявляється тонка структура потоків у полі горизонтальних швидкостей.

6. Відслідковано динаміку та еволюцію висхідних та низхідних потоків фотосферної конвекції. Досліджено особливості розвитку конвективних комірок в залежності від їх розміру: малі гранули (з розмірами до 1.5 Мм) зазвичай виникають спонтанно чи із залишку попередньої гранули і поступово розчиняються; великі гранули (з розмірами більше 1.5 Мм) утворюються з декількох малих залишків шляхом їх об'єднання з подальшою фрагментацією; процес фрагментації може повторитись, і, таким чином, формуються просторово-часові структури на масштабах, близьких до мезогрануляційних.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ОПУБЛІКОВАНІ В РОБОТАХ:

У рецензованих журналах:

1. Баран О.А. Поле горизонтальних конвективних швидкостей за спостереженнями краю диска Сонця / Баран О.А., Стоділка М.І. // Кинематика и физика небесных тел. – 2010. – Т.26, №3. – С. 34–49.
2. Баран О.А. Мезогрануляція в сонячній атмосфері / Баран О.А. // Журнал фіз. досліджень. – 2012. – Т.16, №3. – С. 3902-1–3902-7.
3. Баран О.А. Конвекція в сонячній атмосфері / Баран О.А. // Журнал фіз. досліджень. – 2013. – Т.17, №3. – С. 3903-1–3903-9.
4. Баран А.А. Пространственные вариации конвективных движений в реальной фотосфере Солнца / Баран А.А., Стодилка М.И. // Известия Крымской Астрофизической Обсерватории. – 2013. – Т.109, №3. – С. 31–39.
5. Baran O.A. Power spectra of convective motions in the solar photosphere / Baran O.A. // Advances in Astronomy and Space Physics. – 2013. – Vol. 3. – P. 89–93.
6. Баран О.А. Особливості фотосферної конвекції Сонця на грануляційних, мезогрануляційних і супергрануляційних масштабах / Баран О.А., Стоділка М.І. // Кинематика и физика небесных тел. – 2014. – Т.30, №4. – С. 23–37.
7. Баран О.А. Спостережувана еволюція конвективних потоків у сонячній фотосфері (поле швидкостей) / Баран О.А., Стоділка М.І. // Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка: Астрономія. – 2014. – Вип.51. – С. 25–27.

8. Baran O.A. The dynamics of the observed solar granulation: spatio-temporal variations of line of sight velocity and thermodynamic parameters / Baran O.A. // *Advances in Astronomy and Space Physics*. – 2014. – Vol. 4. – P. 32–37.
9. Баран О.А. Структура фотосферної конвекції Сонця на грануляційних і мезогрануляційних масштабах / Баран О.А., Стоділка М.І. // *Кинематика и физика небесных тел*. – 2015. – Т.31, №2. – С. 21–33.

У працях конференцій:

10. Baran O.A. Structure of convective flows of the real Solar granulation / Baran O.A. // *Advances in Astronomy and Space Physics*. – 2011. – Vol. 1. – P. 53–56.
11. Baran O.A. Structure of convective flows on supergranular scales in the solar photosphere / Baran O.A. // *Advances in Astronomy and Space Physics*. – 2012. – Vol. 2. – P. 153–156.

У збірниках тез конференцій:

12. Баран О.А. Поле горизонтальних конвективних швидкостей за спостереженнями на краю диска Сонця / Баран О.А., Стоділка М.І. // *Тези П'ятої наукової конференції «Вибрані питання астрономії та астрофізики», присвяченої пам'яті Богдана Бабія (1936–1993), 6–8 жовтня 2008 р., Львів, ред. Б.Я. Мелех, М.В. Ваврух*. – Львів: ВЦ Львівського національного університету імені Івана Франка, 2008. – С. 23.
13. Baran O.A. Large-scale Horizontal Flows in the Solar Atmosphere / Baran O.A., Stodilka M.I. // *16th Young Scientists' Conference on Astronomy and Space Physics (YSC'16), April 27 – May 2, 2009, Kyiv, Ukraine: Abstracts*. – К.: ВПЦ «Київський університет», 2009. – P. 52.
14. Баран А.А. Фотосферная конвекция Солнца в поле горизонтальных скоростей / Баран А.А., Стодилка М.И. // *Тезисы конференции «Физика Солнца — наблюдения и теория» 6–12 сентября 2009 г., пос. Научный, АР Крым, Украина. Крымская астрофизическая обсерватория [сайт]. URL: http://solar.crao.crimea.ua/rus/archive/conf/2009/abs_text.htm*.
15. Baran O.A. Structure of the Convective Flows of Real Solar Granulation / Baran O.A. // *17th Young Scientists' Conference on Astronomy and Space Physics (YSC'17), April 26 – May 1, 2010, Kyiv, Ukraine: Abstracts*. – К.: ВПЦ «Київський університет», 2010. – P. 54.
16. Баран А.А. Структура и эволюция конвективных ячеек в солнечной фотосфере / Баран А.А. // *Тезисы конференции «Физика солнечной*

- плазмы и активность Солнца», посвященной памяти С.И. Гопасюка, 5–11 сентября 2010 г., пос. Научный, АР Крым, Украина. Крымская астрофизическая обсерватория [сайт]. URL: http://solar.crao.crimea.ua/rus/archive/conf/2010/Conferences/abs_text.htm.
17. Baran O.A. Observed photosphere convection on different spatial scales / Baran O.A. // 18th Young Scientists' Conference on Astronomy and Space Physics (YSC'18), May 2–7, 2011, Kyiv, Ukraine: Abstracts. – К.: ВПЦ «Київський університет», 2011. – Р. 66.
 18. Баран А.А. Мезогрануляция в фотосфере Солнца / Баран А.А. // Тезисы конференции «Физика Солнца и солнечно-земные связи», посвященной памяти Э.Р. Мустеля, 5–10 сентября 2011 г., пос. Научный, АР Крым, Украина. Крымская астрофизическая обсерватория [сайт]. URL: http://solar.crao.crimea.ua/rus/archive/conf/2011/Conferences/abs_text.htm.
 19. Баран О.А. Спектри потужності фотосферної конвекції Сонця / Баран О.А., Стоділка М.І. // Тези Шостої наукової конференції «Вибрані питання астрономії та астрофізики», присвяченої пам'яті Богдана Бабія (1936–1993), 4–6 жовтня 2011 р., Львів, ред. Б.Я. Мелех, М.В. Ваврух. – Львів: ВЦ Львівського національного університету імені Івана Франка, 2011. – С. 43.
 20. Baran O.A. Structure of convective flows on supergranular scales in the solar photosphere / Baran O.A. // 19th Young Scientists' Conference on Astronomy and Space Physics (YSC'19), April 23–28, 2012, Kyiv, Ukraine: Abstracts. – К.: ВПЦ «Київський університет», 2012. – Р. 59–60.
 21. Баран О.А. Особливості фотосферної конвекції Сонця на різних просторових масштабах / Баран О.А. // Астрономія та фізика космосу у Київському університеті імені Тараса Шевченка, Міжнародна конференція, 22–25 травня 2012 р., Київ, ред. В. Єфименко. – К.: ВПЦ «Київський університет», 2012. – С. 45–46.
 22. Баран А.А. Поле вертикальных скоростей фотосферной конвекции Солнца / Баран А.А., Стодилка М.И. // Международная конференция «Физика Солнца и 24-й цикл» в НИИ «КрАО», 2–8 сентября 2012 г., пос. Научный, АР Крым, Украина. Крымская астрофизическая обсерватория [сайт]. URL: http://solar.crao.crimea.ua/rus/archive/conf/2012/Conferences/abs_text.htm.
 23. Baran O.A. Power spectra of convective motions in the solar photosphere / Baran O.A. // 20th Young Scientists' Conference on Astronomy and Space Physics (YSC'20), April 22–27, 2013, Kyiv, Ukraine: Abstracts. – К.: ВПЦ «Київський університет», 2013. – Р. 59.

24. Baran O.A. The dynamics of the observed solar granulation: spatio-temporal variations of line of sight velocity and thermodynamic parameters // 21th Young Scientists' Conference on Astronomy and Space Physics (YSC'21), April 28 – May 3, 2014, Kyiv, Ukraine: Abstracts. – К.: ВПЦ «Київський університет», 2014. – P. 36.
25. Baran O.A. Vertical structure of the solar granulation: spatio-temporal variations of thermodynamic and kinematic parameters / Baran O.A., Stodilka M.I. // Astronomy and Space Physics, Annual International Conference, May 27–30, 2014, Kyiv, Ukraine: Abstracts. – К.: ВПЦ «Київський університет», 2014. – P. 53–54.
26. Баран О.А. Вертикальна структура сонячної грануляції: просторово-часові варіації термодинамічних і кінематичних параметрів / Баран О.А., Стоділка М.І. // Програма та тези Сьомої наукової конференції «Вибрані питання астрономії та астрофізики», присвяченої пам'яті Богдана Бабія (1936–1993), 7–10 жовтня 2014 р., Львів, ред. Б.Я. Мелех, М.В. Ваврух. – Львів: ВЦ Львівського національного університету імені Івана Франка, 2014. – С. 30.
27. Baran O.A. Convective pressure variations in the solar photosphere / Baran O.A., Stodilka M.I. // Astronomy and Space Physics, Annual International Conference, May 25–29, 2014, Kyiv, Ukraine: Abstracts. – К.: ВПЦ «Київський університет», 2015. – P. 32.
28. Baran O.A. Vertical velocities field of photospheric convection at different spatial and temporal scales / Baran O.A. // Third UK-Ukraine-Spain Meeting on Solar Physics and Space Science. – 2015. – P. 53.

ПЕРЕЛІК ЦИТОВАНИХ ДЖЕРЕЛ

29. Puschmann K. Time series of high resolution photospheric spectra in a quiet region of the Sun. II. Analysis of the variation of physical quantities of granular structures / Puschmann K., Ruiz Cobo B., Vazquez M., et al. // Astron. Astrophys. – 2005. – V.441, № 3. – P. 1157–1169.
30. Nesis A. Dynamics of the solar granulation. IX. A global approach / Nesis A., Hammer R., Roth M., Schleicher H. // Astron. Astrophys. – 2006. – V.451, № 3. – P. 1081–1089.
31. Стоділка М.І. Особенности конвекции в фотосфере Солнца / Стоділка М.І., Баран О.А., Малинич С.З. // Кинем. и физ. небесн. тел. – 2006. – Т.22, № 3. – С. 173–182.
32. Стоділка М.І. Структура фотосферной конвекции Солнца на субгрануляционных масштабах / Стоділка М.І., Баран О.А. // Кинем. и физ. небесн. тел. – 2008. – Т.24, № 2. – С. 99–109.

33. Kostik R. Solar granulation from photosphere to low chromosphere observed in Ba II 4554 A* line / Kostik R., Khomenko E., Shchukina N. // *Astron. Astrophys.* – 2009. – V.506, Issue 3. – P. 1405–1414.
34. Костык Р.И. Особенности конвективных движений в верхней фотосфере Солнца. I / Костык Р.И. // *Кинем. и физ. небес. тел.* – 2010. – Т.26, № 5. – С. 26–40.
35. Hirzberger J. Time Series of Solar Granulation Images. II. Evolution of Individual Granules / Hirzberger J., Bonet J.A., Vazquez M., Hanslmeier A. // *Astrophys. J.* – 1999. – V.515, Issue 1. – P. 441–454.
36. Roudier Th. Families of fragmenting granules and their relation to meso- and supergranular flow fields / Roudier Th., Lignieres F., Rieutord M. et al. // *Astron. Astrophys.* – 2003. – V.409. – P. 299–308.
37. Kostik R. Properties of convective motions in facular regions / Kostik R., Khomenko E.V. // *Astron. Astrophys.* – 2012. – V.545, id.A22. – 9 pp.
38. Stein R.F. Solar Surface Magneto-Convection / Stein R.F. // *Liv. Rev. Solar Phys.* – 2012. – V.9, № 4. – P. 1–51.
39. November L.J. The detection of mesogranulation on the sun / November L.J., Toomre J., Gebbie K.B., Simon G.W. // *Astrophys. J.* – 1981. – Part 2, V.245. – P. L123–L126.
40. Ploner S.R.O. Is solar mesogranulation a surface phenomenon? / Ploner S.R.O., Solanki S.K., Gadun A.S. // *Astron. Astrophys.* – 2000. – V.356. – P. 1050–1054.
41. Matloch L. Mesogranular structure in a hydrodynamical simulation / Matloch L., Cameron R., Shelyag S. // *Astron. Astrophys.* – 2010. – V.519, id.A52. – 5 pp.
42. Yelles Chaouche L. Mesogranulation in the Solar Surface Magnetic Field Distribution / Yelles Chaouche L., Moreno-Insertis F., Martinez Pillet V., et al. // *Astrophys. J. Lett.* – 2011. – V.727, Issue 5, id.L30. – 6 pp.
43. Rieutord M. The Sun's Supergranulation / Rieutord M., Rincon F. // *Liv. Rev. Solar Phys.* – 2010. – V.7, № 2. – 82 pp.
44. Roudier Th. Structure and evolution of solar supergranulation using SDO/HMI data / Roudier Th., Svanda M., Rieutord M., et al. // *Astron. Astrophys.* – 2014. – V.567, id.A138. – 8 pp.
45. Hathaway D.H. The Sun's Photospheric Convection Spectrum / Hathaway D.H., Teil T., Norton A.A., Kitiashvili I. // *Astrophys. J.* – 2015. – V.811, Issue 2, id.105. – 10 pp.
46. Malherbe J.-M. Families of Granules, Flows, and Acoustic Events in the Solar Atmosphere from Honode Observations / Malherbe J.-M., Roudier Th., Frank Z., Rieutord M. // *Solar Phys.* – 2015. – V.290, Issue 2. – P. 290–321.

47. Khomenko E.V. Five-minute oscillations above granules and intergranular lines / Khomenko E.V., Kostik R.I., Shchukina N.G. // *Astron. Astrophys.* – 2001. – V.369. – P. 660–671.
48. Socas-Navarro H. An open-source, massively parallel code for non-LTE synthesis and inversion of spectral lines and Zeeman-induced Stokes profiles / Socas-Navarro H., de la Cruz Rodriguez J., Asensio Ramos A., et al. // *Astron. Astrophys.* – 2015. – V.577, id.A7. – 10 pp.
49. Стоділка М.І. Задача двовимірного переносу випромінювання для багаторівневих атомів / Стоділка М.І., Рикалюк Р.Є. // *Журнал фізичних досліджень.* – 1998. – Т.2, № 3. – С. 427–432.
50. 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.
51. 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.
52. Nordlund A. Solar Surface Convection / Nordlund A., Stein R.F., Asplund M. // *Liv. Rev. Solar Phys.* – 2009. – V.6, № 2. – 117 pp.

АНОТАЦІЯ

Баран О.А. Структура і динаміка фотосферної конвекції Сонця на різних просторово-часових масштабах. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.03.03 – Геліофізика і фізика Сонячної системи. – Головна астрономічна обсерваторія НАН України, Київ, 2016.

У дисертації містяться нові результати, що стосуються діагностики структури та динаміки фотосферної конвекції Сонця на різних просторово-часових масштабах, отриманої на основі високоякісних спостережень на 70-см німецькому вакуумному баштовому телескопі VTT (Канарські острови, Іспанія). З допомогою розв'язку оберненої задачі нерівноважного переносу випромінювання побудовано сітку моделей неоднорідної фотосфери Сонця на грануляційних (0.5–5.0 Мм), мезогрануляційних (5–12 Мм) та супергрануляційних (20–40 Мм) масштабах. Відтворено енергетику конвективних рухів у фотосфері Сонця. Досліджено стратифікацію вертикальних швидкостей і варіацій термодинамічних параметрів (температури, тиску, густини) фотосферної конвекції. Показано, що конвективна структура фотосфери на грануляційних і мезогрануляційних масштабах подібна. Проаналізовано стру-

ктуру горизонтальних швидкостей в атмосфері Сонця. Знайдено суттєву відмінність супергрануляції від конвективних утворень менших масштабів. Проведено дослідження динаміки та еволюції висхідних та низхідних конвективних потоків, виявлено особливості розвитку комірок залежно від їх розміру.

Ключові слова: атмосфера Сонця, фотосферна конвекція, грануляція, мезогрануляція, супергрануляція.

АННОТАЦІЯ

Баран А.А. Структура и динамика фотосферной конвекции Солнца на разных пространственно-временных масштабах. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.03.03 – Гелиофизика и физика Солнечной системы. – Главная астрономическая обсерватория НАН Украины, Киев, 2016.

Диссертация посвящена диагностике структуры и динамики неоднородной атмосферы Солнца на грануляционных, мезогрануляционных и супергрануляционных масштабах. Основой исследования являются данные современных наблюдений на 70-см германском вакуумном башенном телескопе VTT (Канарские острова, Испания). Путем решения обратной задачи неравновесного переноса излучения воспроизведено поле вертикальных скоростей и вариации термодинамических параметров (температуры, давления, плотности) в фотосферных слоях. На основе данных наблюдений на краю диска Солнца методом λ -метра воспроизведено поле горизонтальных скоростей в атмосфере Солнца. С помощью $(k - \omega)$ -фильтрации выделена конвективная компонента вариаций.

Рассчитаны спектры мощности температурных вариаций и вертикальных скоростей конвективных движений на разных высотах в солнечной фотосфере. Проанализированы изменения спектров с высотой. Обнаружено, что мощность конвективных движений максимальна на грануляционных масштабах и уменьшается с высотой; мощность вариаций вертикальных скоростей на масштабах $\lambda > 12$ Мм практически не изменяется на всех исследуемых высотах.

Построена сетка моделей неоднородной фотосферы Солнца на разных пространственно-временных масштабах – грануляции (0.5–5.0 Мм), мезогрануляции (5–12 Мм) и супергрануляции (20–40 Мм). Исследована стратификация вертикальных скоростей и вариаций температуры, давления, плотности на грануляционных и мезогрануляционных мас-

штабах, а также стратификация вертикальных скоростей на супергрануляционных масштабах. Обнаружено, что на масштабах грануляции и мезогрануляции вариации температуры и конвективные скорости максимально коррелируют в нижней фотосфере, найдены температурная инверсия и инверсия вертикальных скоростей в слоях средней фотосферы ($h \approx 200$ км), вариации давления преимущественно положительные в восходящих потоках и отрицательные – в нисходящих, обнаружена инверсия плотности на границе между нижней и средней фотосферой ($h \approx 80$ км). Показано, что на супергрануляционных масштабах поле вертикальных скоростей супергрануляции, в отличие от меньших масштабов, почти не меняется в фотосферных слоях. Проведенный анализ вариаций указывает на то, что мезоструктуры представляют грануляцию на больших масштабах.

По данным наблюдений на краю солнечного диска изучено поле горизонтальных скоростей конвективных движений в фотосферных слоях (на высотах $h = 250$ км), а также в области температурного минимума и в начале нижней хромосферы ($h \approx 530\text{--}610$ км). Отмечено увеличение горизонтальных скоростей на мезогрануляционных масштабах с высотой; амплитуда горизонтальных скоростей на супергрануляционных масштабах слабо меняется на этих высотах. Для всех исследуемых масштабов обнаружено смещение потоков в области температурного минимума и в начале нижней хромосферы относительно их положения в фотосферных слоях; проявляется тонкая структура потоков в поле горизонтальных скоростей.

Изучена стратификация вертикальных скоростей и температурных вариаций внутри восходящих и нисходящих потоков фотосферной конвекции на разных стадиях эволюции. Проанализировано, как эти параметры изменяются во времени внутри малых (с размерами до 1.5 Мм) и больших (с размерами более 1.5 Мм) грануляционных ячеек. Обнаружено, что малые и большие гранулы отличаются по способам их образования и распада.

Ключевые слова: атмосфера Солнца, фотосферная конвекция, грануляция, мезогрануляция, супергрануляция.

ANNOTATION

Baran O.A. Structure and dynamics of the solar photospheric convection at different spatial and temporal scales. – Manuscript.

Candidate degree thesis. Speciality 01.03.03 – Heliophysics and physics of Solar System. – Main Astronomical Observatory of National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, 2016.

The dissertation contains new results concerning the diagnostics of structure and dynamics of the solar photospheric convection at different spatio-temporal scales obtained from the high quality observations on the 70-cm German Vacuum Tower Telescope (VTT) (Canary Islands, Spain). The models for the solar inhomogeneous photosphere at granular (0.5–5.0 Mm) mesogranular (5–12 Mm) and supergranular (20–40 Mm) scales are constructed by the solution of the inverse nonequilibrium radiative transfer problem. Power of the convective motions in the solar photosphere is reproduced. Stratification of the vertical velocities and variations of the thermodynamical parameters (temperature, pressure, density) of the photospheric convection is investigated. It is shown that the convective structure of photosphere at granular and mesogranular scales is similar. Structure of the horizontal velocities in solar atmosphere is analyzed. We found a significant difference between supergranulation and convective structures at smaller scales. Dynamics and evolution of the ascending and the descending convection flows are studied, peculiarities of the cells are defined by their sizes.

Key words: solar atmosphere, photosphere convection, granulation, mesogranulation, supergranulation.

*Підписано до друку 19.02.2016р. Формат 60x84/16.
Папір офсетний. Гарнітура Times New Roman. Друк на
різографі. Умов.друк.арк. 1.2. Наклад 100 прим. Зам. №49/02*

*Друк: Колективне підприємство «Палітурник»
м. Львів, вул. Руська, 20
тел.: (032) 235-58-78*