

## КОНВЕКЦІЯ В СОНЯЧНІЙ АТМОСФЕРІ

О. А. Баран

*Астрономічна обсерваторія*

*Львівського національного університету імені Івана Франка  
вул. Кирила і Мефодія, 8, м. Львів, 79005, Україна*

(Отримано 22 березня 2013 р.; в остаточному вигляді — 17 червня 2013 р.)

Однією з характерних особливостей конвективних рухів на поверхні Сонця є наявність комірчастої структури окремих масштабів. На сьогодні, виділяють чотири різні конвективні масштаби в сонячній атмосфері за зростанням просторових розмірів: грануляцію, мезогрануляцію, супергрануляцію та гігантські комірки.

У цьому огляді подано широкий і детальний перелік ранніх і сучасних праць із дослідження конвективних рухів в атмосфері Сонця на різних просторово-часових масштабах, урахувавши спостереження, теоретичні праці й чисельне моделювання сонячної конвекції. Проаналізовано основні здобутки у вивченні структури й динаміки грануляції та супергрануляції, спроби виділити й дослідити конвекції мезогрануляційних масштабів і гігантських комірок.

**Ключові слова:** сонячна конвекція, грануляція, мезогрануляція, супергрануляція, гігантські комірки.

PACS number(s): 96.60.-j, 95.30.Tg

### I. ВСТУП

Атмосфера Сонця являє собою неоднорідну нерівноважну фізичну систему зі складною просторово-часовою поведінкою. Вивчення реальної атмосфери Сонця — її структури, динаміки, фізичних умов, процесів, що відбуваються в ній, — є основною частиною проблем фізики Сонця.

Поблизу сонячної поверхні, тобто шару, з якого випромінюється основна кількість фотонів, відбувається перетворення конвективної енергії в радіаційну. При цьому висхідні конвективні потоки газу, згенеровані в нижніх шарах, проникають за інерцією в стабільну фотосферу і приводять до виникнення в її верхніх шарах гідродинамічних і температурних збурень, які взаємодіють між собою.

При спостереженнях випромінювання Сонця виявляють флуктуації інтенсивності, швидкості та інших величин, що описують стан сонячної атмосфери. Структура атмосфери Сонця представлена різними масштабами — від найбільших, пов'язаних із диференціальним обертанням і меридіальною циркуляцією, до утворень менших масштабів: грануляції, тобто комірок розміром близько 1 Мм, що відображають високотурбулентні конвективні процеси в підфотосферних шарах, супергрануляції розміром близько 30 Мм, можливо, як результату більш глобальної конвекції, а також мезогрануляції — утворень проміжних масштабів (гранула-супергранула). Кожен елемент такої неоднорідної сонячної атмосфери бере одночасно участь у багатьох рухах, які становлять спостережуване поле швидкостей.

Фізичні процеси, що відбуваються як в атмосфері Сонця, так і в підфотосферних шарах, можуть стати зрозумілишими завдяки детальному аналізу окремих структурних утворень у фотосфері. Фотосферні спостереження грануляції, мезо- і супергрануляції дають

змогу поглянути на енергетику конвекції, що відбувається під фотосферою. Розміри конвективних комірок, їхня форма, тривалість життя та характеристики їхнього потоку проливають світло на складну динаміку конвективних рухів під поверхнею Сонця. Дослідження конвекції сприяє кращому розумінню фізики складної взаємодії гідродинамічних і температурних збурень у сонячній атмосфері.

У цій статті зроблено широкий і докладний огляд ранніх і сучасних праць з дослідження конвективних рухів в атмосфері Сонця на різних просторово-часових масштабах: грануляції, мезогрануляції, супергрануляції і гігантських комірок.

### II. ГРАНУЛЯЦІЯ

На поверхні спокійного Сонця найбільш видимим фотосферним явищем є поверхнева грануляція. Уперше сонячну грануляцію спостеріг й описав Гершель у 1801 р. [31]. Він спробував пояснити “гарячі хмари”, що плавали над холодною сонячною поверхнею. У [16] вперше застосовано термін “грануляція”. Перші чіткі фотографії в роботі [37] завершили дискусію щодо форм виявлених фотосферних утворень.

У праці [84] грануляція вперше була ідентифікована як конвекція. Подальші спостереження [79] показали, що яскраві гранули являють собою потоки висхідного газу, темні лінії — низхідного газу. Це було прийнято як основний аргумент на користь припущення, що грануляція є конвективним явищем. При спостереженні була виявлена висока кореляція між інтенсивністю та швидкістю навіть на найменших спектрографічних спостережуваних масштабах (понад 500 км, [21]). Іншим вагомим аргументом вважати гранули конвективними комірками був сам факт спостереження обмеженого ряду горизонтальних масштабів, біль-

шість із них мали діаметри від 1'' до 2''. Результати дослідження конвекції, отримані до 1990 р., наведені в огляді [74] і в роботі Дравінса [23].

У ранніх працях припускали, що грануляція виникає внаслідок виділення енергії йонізації водню під видимою поверхнею Сонця в бульбашках газу, що піднімаються [72, 84]. З іншого боку, числове моделювання дає грануляційну структуру як суто поверхнєве утворення, основане на радіаційному охолодженні у фотосфері [76]. Сучасні дослідження [3] дозволяють заглянути в нижні шари фотосфери — у сильно турбулентну зону. У глибоких шарах конвективної зони швидкість руху речовини досить висока (близька до звукової), проте на останніх декількох сотнях кілометрів сонячної поверхні конвективний потік починає зменшуватися. Загальний потік енергії сталий, тому потік випромінювання повинен збільшуватися, щоби компенсувати зменшення конвективного потоку. Це досягається підвищенням градієнта температури. У цих шарах речовина, що рухається вгору, має вищу температуру і, відповідно, меншу густину, ніж навколишнє середовище; ця речовина проходить через шари з пониженою йонізацією, при цьому вивільняється енергія йонізації, що приводить до підвищення температури газу. Таким чином грануляція, видима на поверхні Сонця, являє собою проникнення з конвективної зони в стабільну стратифіковану фотосферу гарячої речовини з високою ентропією. У фотосферних шарах плавучість комірок поступово спадає, при цьому відбуваються втрати йонізаційної й теплової енергії за рахунок виходу випромінювання та виконання роботи з розширення газу. Речовина стає порівняно холодною і з більшою густиною. Потік розвертається й формує міжгрануляційну сітку. Отже, грануляція врівноважує втрати енергії на випромінювання й підтримує збереження маси в конвективних шарах [57].

Досліджуючи структуру й динаміку сонячної грануляції, аналізують, в основному, спостережувані флуктуації інтенсивності та конвективних швидкостей. З іншого боку, використовують результати чис-

лового моделювання сонячної конвекції. На сьогодні отримано багатомірні моделі грануляції, які відтворюють спостереження [8, 25, 76]. Останніми роками зростає зацікавлення до інверсними методами дослідження структури атмосфери Сонця, які, на відміну від класичного підходу, дають змогу безпосередньо зі спостережень отримувати інформацію про фізичні процеси, що впливають на випромінювання: у роботах [3–5, 10] досліджено грануляцію за профілями ліній із високим просторовим розділенням та з урахуванням ефектів відхилення від локальної термодинамічної рівноваги (ЛТР).

Грануляція пов'язана з конвективним перенесенням теплової енергії комірками з горизонтальними масштабами близько 0.5 ÷ 2.0 Мм [68]. Сучасні спостереження [67] дають спектр потужності як флуктуацій інтенсивності, так і вертикальних швидкостей із максимальною амплітудою на масштабах близько 1.7 Мм із сильною залежністю від висоти для  $V_z$ . В іншій роботі [7] середній діаметр грануляційних структур дещо менший — 1050 км, а також виділено так звані мінігрануляційні структури розміром менше 600 км.

Завдяки контрасту яскравості (близько 15% [7, 67]) сонячна грануляція проявляється на зображеннях у білому світлі, отриманих із достатнім розділенням, як система яскравих комірок, розділених вузькими темними проміжками, що постійно виникають і (через декілька хвилин) зникають у фотосфері Сонця. Різниця температури між центром і краєм грануляційної комірки не менша, ніж 100 К [3]. Характерні вертикальні швидкості — близько 1 км/с, тоді як горизонтальні швидкості — близько 2 км/с [82]. Дослідження грануляції на спокійному Сонці показують, що середня тривалість життя гранул визначений в межах від 5 хв [82] до 16 хв [48].

*а. Структура грануляції* Спостереження грануляції з високим розділенням указують на те, що в деталях структура грануляції не настільки проста, як припускають у зв'язку з її конвективним походженням (рис. 1).

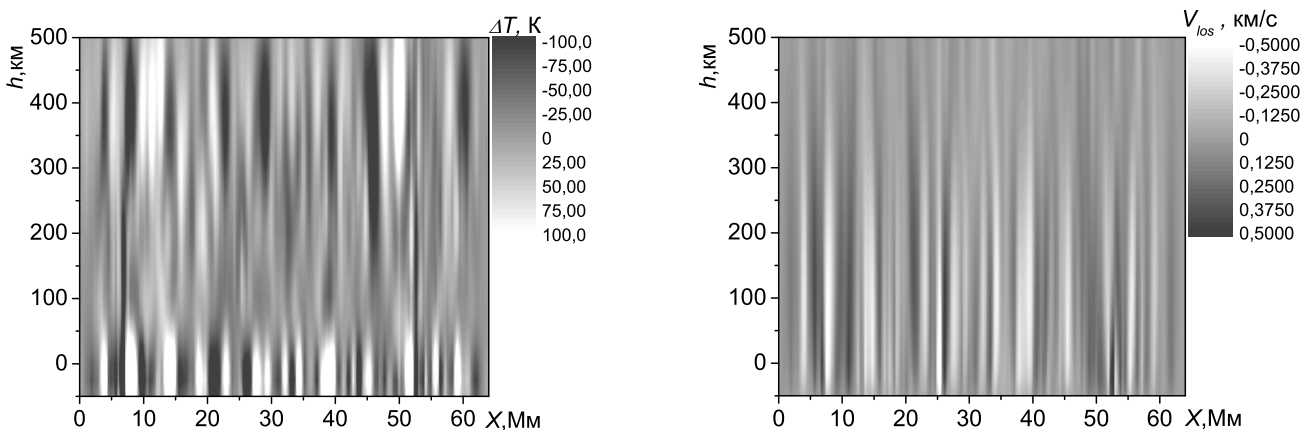


Рис. 1. Просторові розподіли варіацій температури (зліва) і вертикальних швидкостей (справа) на грануляційних масштабах у сонячній фотосфері у фіксований момент часу (рисунок із роботи [4]).

У роботі Костика [2] під час дослідження тонкої структури фраунгоферових ліній уперше помічено, що речовина центральних частин конвективних комірок на великих висотах може стати холоднішою за міжгранули, хоча продовжуватиме рухатися вгору. Тут відбувається інверсія варіацій температури, пов'язана зі швидким адіабатичним розширенням і радіаційним охолодженням газу висхідного потоку, розігрівом за рахунок стискання низхідного газу, а також чутливістю коефіцієнта поглинання від'ємного йона водню  $H^-$  до зміни температури [63]. Подальші експериментальні роботи та роботи з моделювання (огляд ранніх праць подано в [4, 24]) присвячені дослідженню висот, на яких варіації температури в окремих гранулах і міжгранулах із максимального значення на висоті  $h = 0$  км ( $\tau_{5000} = 1$ ) знижуються до мінімальних значень (рис. 1, зліва). У [42] досліджено сонячну грануляцію в межах 16-колончастої моделі; за допомогою кореляційного аналізу показано, що зміна контрасту гранул і міжгранул здійснюється на висоті  $h \approx 250$  км, а на висоті  $h \approx 490$  км відбувається зміна напрямку руху речовини; найбільш типовими й ефективними є чотири типи рухів: у перших двох речовина змінює тільки знак контрасту, у двох останніх відбувається зміна і знака контрасту, і напрямку руху. В роботі [43] показано, що висота інверсії сильно залежить від контрасту інтенсивності та значення швидкості конкретної комірки в континуумі: що більші ці параметри, то вище відбувається інверсія.

У [39] показано, що структури яскравості та швидкості збігаються до висоти 100 км над рівнем утворення континууму, а поле швидкостей у вигляді вертикальних циліндричних колонок зберігається до висоти  $h \approx 250$  км; вище така колончаста структура руйнується. У праці [24] наведено результати докладного вивчення вертикальної структури фотосфери, куди гранули проникають знизу: якщо в нижніх шарах фотосфери спостерігається висока кореляція між температурою й вертикальною швидкістю (за рахунок дії сил плавучості), то у верхніх шарах, куди гранули проникають за інерцією, виявлено інший тип особливостей. За результатами кореляційного аналізу [24] конвективні потоки для всіх гранул  $> 1''.$ 4 досягають верхніх шарів фотосфери, тоді, як висота проникнення гранул  $< 1''.$ 4 зменшується. Згідно з [63] на висотах  $h \approx 370$  км можна виявити потоки близько  $4''.$  У роботі [4] (рис. 1) великі гранули (розміром не менше  $1''.$ 5) досягають моменту максимального розвитку висот температурного мінімуму; правда, трапляються гранули менших розмірів (близько  $1''.$ 0), які також потрапляють у ці шари. Пізніше у праці [43] виявлено й досліджено грануляцію в ширшому діапазоні висот аж до нижньої хромосфери.

Характеристики окремих гранул сильно відрізняються при переході від одної комірки до іншої. Отримані в роботі [56] різкі доплерівські зсуви на краю комірки свідчили про асиметрію конвективного потоку всередині: максимум швидкості був зміщений до краю комірки, і тільки третя частина всіх розглянутих випадків давала повну відповідність між

максимумом швидкості та максимумом інтенсивності всередині гранули; інколи максимум висхідної швидкості відповідав практично нульовій інтенсивності, або ж, навпаки, максимуму інтенсивності — низхідний потік. Пізніше асиметричний розподіл конвективної швидкості всередині великих комірок виявлено в роботах [34, 63]. У праці [42] на висоті  $h = 0$  км приблизно 75% конвективних утворень відповідають класичній грануляції: гаряча матерія піднімається, а холодна — опускається, а на  $h = 700$  км тільки близько 20%. Горизонтальні зміщення температурної структури грануляційного потоку щодо структури його конвективної швидкості, а також тонку структуру великих грануляційних потоків (їх фрагментацію на декілька менших потоків) виявлено й досліджено в роботі [5]. Магнітні поля модифікують властивості конвекції [77]: проявляються дрібніші структурні утворення; швидкості зменшуються у висхідних потоках і збільшуються в низхідних; кореляція між полем швидкостей та інтенсивності, властива грануляції, руйнується [44, 54].

*б. Динаміка грануляції* Гранули — нестационарні утворення: на поверхні Сонця висхідні потоки через швидке розширення газу та радіаційні втрати охолоджуються і втрачають свою стійкість — одні гранули зникають, інші pojawiaються. Нова комірка формується на місці попередньої або зі злиття двох; інколи її виникнення відбувається спонтанно. Досягнувши максимальної фази, гранула переходить у фазу розпаду. Розпадаються вони також різними способами: розділенням, злиттям або ж поступово зникають [4, 10, 22]. У ранніх працях дослідження еволюції сонячної грануляції полягає саме у визначенні тривалості існування окремих конвективних структур [48, 82]. Докладний опис розвитку окремих гранул вимагав спостережуваних даних із більшим розділенням, ніж те, яке потрібне лише для звичайного розпізнавання. Пізніше виявляють різні механізми їх утворення й розпаду конвективних комірок. У праці [22] описано можливі способи таких процесів і визначено їхню тривалість. У [33] на основі даних з високою часовою та просторовою роздільною здатністю встановлено, що еволюція комірок визначається фізикою підфотосферних шарів, що має місце на масштабах близько  $1''.$ 4 ( $\approx 1000$  км) і приводить до фрагментації комірок на менші й менші елементи: для малих масштабів очікується ефективніша передача тепла від гранул у міжгрануляційне середовище. Подібні результати отримані в роботах [10, 25]: гранули розмірів менше  $1''.$ 5 переважно розчиняються, тоді як великі гранули — фрагментують, тому що вони менш стійкі через більший внутрішній надлишковий тиск [25].

У праці [61] виділено три типи гранул: 1) активні гранули, які підтримують процеси розпаду та злиття і збільшуються монотонно від одного розділення до наступного; 2) спокійні гранули, які стаціонарні в розмірах; 3) загасаючі гранули, які зменшуються монотонно і зникають у кінцевому випадку. Такий поділ узгоджується з роботою [53]: деякі з гранул, згадані вище як активні (їх ще називають вибухаючими),

швидко (у межах  $\sim 8$  хвилин) розширюються до великих розмірів ( $3'' \div 5''$ ), спостерігається потемніння в центрі та розщеплення з формуванням темних радіально направлених ліній усередині; ці процеси можуть повторюватись у декількох поколіннях. Це означає, що один фрагмент такої гранули вибухатиме заново. Вибухаючі гранули описують як яскраві кільцеподібні конвективні структури, що фрагментуються на декілька малих гранул. Такі гранули згідно з [53], займають понад 2.5% загальної спостережуваної площі, а згідно з [48] — понад 4%. Середня швидкість їх горизонтального поширення  $0.7 \div 2.0$  км/с, а їхній максимальний діаметр перед фрагментацією досягає величини  $3''.3 \div 5''.4$  [33].

Явище вибухаючих гранул побачили також у чисельних моделюваннях сонячної грануляції [64, 74]. У роботі [33] з використанням даних із високим розділенням досліджено динаміку вибухаючих гранул і пов'язані з цим явища. Нордлунд і ін. [57] пояснюють описані явища збільшенням тиску в центрі таких гранул, яке необхідне для руху зростаючого горизонтального потоку зі збереженням маси. Відповідно збільшується густина, і це веде до негативної плавучості, вертикальна швидкість, зрештою, стає недостатньою для підтримання поверхневого свічення. У наслідок охолодження прискорює процес і змінюється напрямок вертикального потоку. Подібне припускалося ще в ранній праці [53].

### III. МЕЗОГРАНУЛЯЦІЯ

У 1981 р. за допомогою просторово-часового усереднення 2D (двовірних) вимірювань доплерівських швидкостей по лініях Mg I 5173 і FeI 5434, які отримали в центрі диска Сонця Новембер і його співробітники [58], уперше знайдено квазістаціонарні комірчасті утворення з амплітудою вертикальної швидкості 60 м/с, характерними масштабами  $5 \div 10$  Мм і тривалістю життя приблизно 2 год. Ці дані підтверджували теорію конвекції, що сформулювали Сімон і Лейтон [72], згідно з якою повинна існувати конвекція на проміжних масштабах, яка б могла асоціюватися з першою йонізацією гелію. Відповідно введено термін “мезогрануляція” з метою вказати на ймовірний конвективний характер явища на масштабах між грануляцією і супергрануляцією, якого не вистачає. Поле горизонтальних швидкостей на цих мезогрануляційних масштабах виявлено пізніше в [81]. Деякі роботи були присвячені дослідженню мезогрануляції на різних висотах у сонячній атмосфері [38, 59].

У роботі [21] знайдено свідчення конвективної природи явища мезогрануляції, обчислено середню вертикальну швидкість всередині мезогранул — 300 м/с і горизонтальну — 750 м/с. У праці [87] показано, що параметри фотосферної структури, такі, як вертикальні поля швидкостей, еволюція (фрагментація і час життя), інтенсивність і характерні горизонтальні рухи, варіюють на масштабах між грануляцією і супергрануляцією. У новішій праці Новембер [60] ста-

вить під сумнів вибраний термін і пропонує інтерпретувати виявлені конвективні явища як вертикальну компоненту конвекції на супергрануляційних масштабах.

Тривалий час відбувалася дискусія про просторові та часові масштаби мезогрануляції. Так, у праці [26] за спектрами потужності виявлено конвективні структури на масштабах  $4 \div 7$  Мм, проте не встановлено відмінностей цих структур від супергрануляції. Подібні розміри отримані в [21] на основі дослідження кореляції між швидкістю і флуктуаціями інтенсивності. У праці [15] автори знайшли збільшення потужності на ділянці спектра, що відповідає масштабам  $2.2 \div 10.0$  Мм. У [83] встановлено середню тривалість життя  $30 \div 40$  хв для мезогрануляції на масштабах  $18''$  (13 Мм). Деяко менші розміри мезогрануляції  $5'' \div 10''$  ( $4 \div 7$  Мм) знову знайдено за допомогою кореляційного аналізу в [71]. У праці [45] виявлено мезогрануляційний пік на ще менших масштабах, ніж усі попередньо знайдені, — 4 Мм. Що ж до тривалості існування можливих мезогрануляційних комірок, то в роботі [69] гістограми з візуальних спостережень дають тривалість життя мезогранул між 10 хв і 160 хв з піком розподілу в околі  $30 \div 40$  хв; непрямим методом, використовуючи кореляційний аналіз, автори отримали час життя від 16 хв до 185 хв залежно від часового вікна та використаних методів. Пізніше в праці [71] встановлено середню тривалість життя  $30 \div 40$  хв, а в роботі [46] — 158 хв.

На сьогодні питання про представлення мезогрануляції окремими масштабами конвекції, відмінними від грануляції та супергрануляції, залишається найбільш суперечливим. З одного боку, дослідження горизонтальних швидкостей локальним кореляційним методом виявили потоки з характерними розмірами, більшими за грануляційні (для прикладу [12]). Проте просторово-часові дослідження двовимірної спектроскопії показали, що явище мезомасштабів повністю відмінне від супергрануляції і є частиною широкого розподілу грануляційних масштабів: у роботі [78] автори доводять, що мезогранули є проявом швидкого розширення гранул на більші масштаби. На спектрі потужності, отриманому з MDI (Michelson Doppler Imager) спостережень в [28], виявлено лише два піки, що відповідають грануляції й супергрануляції.

Достатня кількість праць присвячена дослідженню мезогрануляції на основі специфічних властивостей окремих гранул розширяється до більших масштабів. Особливо обговорюють ефекти вибухаючих (активних) гранул, описані вище. У праці [40] уперше виявлено у фотосфері Сонця довгоживучі структури, які названі “сімействами активних гранул”: такі гранули неодноразово розширювалися і фрагментувалися, що просторово збігалось з найяскравішими місцями фотосфери. У [61] автор припустив, що активні гранули формують мезогрануляційні утворення — такі гранули виявлені навколо мезогранули і визначають межі комірок мезогрануляції. З іншого боку, в роботі [82] стверджується, що майже всі активні гранули локалізовані всередині мезогрануляційних пото-

ків. У роботі [12] досліджено властивості грануляції на мезогрануляційних масштабах і показано, що такі характеристики, як площа, тривалість життя, яскравість і темпи росту гранули свідчать про її локалізацію в мезогранулі: малі, слабкі, короткоживучі та швидко колапсуючі гранули локалізовані переважно в областях із низхідним мезогрануляційним потоком, тоді як яскраві, довгоживучі гранули, що швидко розвиваються, популюють переважно у висхідних потоках.

Зв'язок між мезогрануляційними потоками й вибухаючими гранулами підтверджено числовим моделюванням [64]: тривалість життя стабільних низхідних потоків, що виникають усередині вибухаючих гранул, набагато довший, і вони проникають набагато глибше в конвективну зону, ніж це відбувається по краях звичайної гранули. У праці [6] виявлено, що основні фізичні властивості (температура, швидкість, розміри) грануляції змінюються істотно вздовж фотосфери Сонця: яскраві великі гранули зі швидкими висхідними потоками переважно концентруються всередині комірок мезогрануляції, тоді як темніші широкі міжгранули з низхідним потоком концентруються в міжмезогранулах і займають близько  $2/3$  їхньої площі. Квазіперіоди, пораховані зі спектра потужності, свідчать про існування мезогрануляційних утворень із характерними просторовими масштабами  $2''.5 \div 11''.0$ . Розщеплюючись у вищих шарах конвективної зони, мезогрануляційні конвективні потоки відіграють рушійну роль у продукуванні вибухаючих гранул із параметрами, що варіюють на мезомасштабах, та у визначенні варіацій фізичних властивостей тонкої структури грануляції вздовж фотосферної поверхні.

Дослідження серії часових зображень сонячної грануляції у праці [33] показало, що малі гранули (також гранули з короткою тривалістю життя) здебільшого локалізовані в околі низхідних потоків мезогрануляції, а великі гранули — в околі висхідних потоків. Припущення про зв'язок активних гранул і мезогрануляційних потоків зроблено в [52] на основі порівняння середніх розмірів довгоживучих активних гранул і мезогрануляційних масштабів. У праці [62] знайдено, що гранули, які в процесі своєї еволюції фрагментуються, переважно локалізовані в ділянках висхідних потоків, а “загасаючі” гранули — у тих ділянках мезогранул, що зв'язані з низхідними потоками.

Із досліджень [66] стало відомо, що встановлення чи інтерпретація природи потоків більших масштабів залежить від методу та методики обробки даних. Автори стверджують, що просторова кореляція між вибухаючими гранулами може створювати великомасштабну нестабільність на більших масштабах. Таким чином, структурні утворення, більші за грануляційні, отримують унаслідок усередненої обробки даних, проте мезогрануляція не є справжніми елементами конвекції. Взаємодію грануляційних низхідних потоків, що кластеризуються і продукують конвективні структури великих розмірів, змодельовано в праці [65].

У [70] підтверджено припущення, що мезогранули не є окремим масштабом конвекції, а тільки великомасштабним витягуванням грануляції. У цій же праці за допомогою 3D-аналізу поля інтенсивності на грануляційних масштабах автори виявили, що значна частка гранул у сонячній фотосфері об'єднується в подібні утворення, згадані раніше і названі як “дерева” з гранул, що фрагментуються. Ці структури беруть початок з однієї гранули, яка розпалася, і з часом налічують цілу ієрархію, що продовжує фрагментуватися. У праці [66] виявлено, що вони покривають 60 відсотків сонячної поверхні в будь-який момент; тривалість життя таких грануляційних сімейств може сягати кількох годин, їхні розміри — до 6 Мм. Ці утворення схожі з мезогранулами і наводять на думку, що мезогрануляція повинна бути пов'язана з властивостями просторової та часової структури гранул.

У роботі [47] представлено спрощену модель грануляції, яка добре імітує злиття й розділення гранул; на основі цієї моделі автори також дійшли висновку, що статистичні властивості та поведінку мезогрануляційних структур отримують унаслідок просторового й часового усереднення даних. У праці [67] автори, використовуючи доплерівські вимірювання вертикальної швидкості з Hinode/SOT, також не знайшли спостережуваного підтвердження структур на масштабах між грануляцією та супергрануляцією. У будь-якому разі, у роботі [68] запропоновано в подальшому дослідженні сонячної конвекції масштаби в межах від 4 Мм (найбільші можливі грануляційні масштаби) до 12 Мм (найменші супергрануляційні масштаби) називати мезогрануляційними масштабами.

Отже, такі суперечливі результати з виявлення мезогрануляції окремого виду конвекції вимагають подальших досліджень із визначення просторово-часового розподілу температури, швидкості, тиску, магнітного поля на цих проміжних масштабах.

#### IV. СУПЕРГРАНУЛЯЦІЯ

Супергрануляційні потоки з характерними розмірами 26 Мм й амплітудою швидкості 170 м/с були вперше виявлені в 1953 р. під час вивчення варіацій екваторіальної кругової швидкості з використанням автокореляційного методу [30]. Детальніше вивчення цих структур із використанням доплерограм повного диска утвердило їх як явище поверхневої конвекції Сонця: у праці [72] вперше з'являється назва нової конвективної моди — “супергрануляція”. Автори докладно проаналізували комірки з потоками великих масштабів і знайшли, що швидкості потоків є переважно горизонтальними зі значеннями близько  $300 \div 500$  м/с; акцент ставиться на тісню кореляцію між супергрануляцією, хромосферною сіткою та розподілом магнітного поля спокійного Сонця: виявлено, що межі супергранул відповідають хромосферній сітці Ca II K. Магнетограми та спектрогеліограми використовують для відслідковування супергрануляції й по сьогодні (наприклад, [18]), проте динамічна взає-

модія між магнітними полями й супергрануляцією ще достатньо не визначена.

Отже, на основі ранніх фотосферних спостережень супергрануляція утвердилася як система конвективних комірок із горизонтальним рухом речовини. Основні труднощі виникали у вимірюванні швидкостей супергрануляції при наявності сильних 5-хвилинних осциляцій. Вимірювання супергрануляційних горизонтальних потоків поблизу лімба виявилися найкращими для відтворення [1]. Крім того, на базі теоретичних досліджень конвекції було припущено, що комірчасті рухи великих горизонтальних масштабів, типових для супергрануляції, повинні б потрапляти набагато вище в стабільну атмосферу, ніж рухи менших масштабів [59].

На сьогодні відомо, що потік супергрануляції розходиться з центру комірки назовні, обмежуючись на краях контуром із сильних фотосферних магнітних полів і хромосферної сітки [68]: теплий потік, ймовірно, піднімається в центрі комірки, а холодний опускається на краях. Проте виявлені горизонтальні флуктуації інтенсивності на масштабах супергрануляції дуже малі. Останні дослідження показують, що супергранули дещо тепліші в центрі. Різниця температур у центрі й на краю менша за 3 K [27].

Багато робіт опубліковано з аналізу параметричних властивостей супергрануляційних комірок. На визначення розміру комірок супергрануляції сильно впливає метод, який використовують для цього. У праці [30] уперше отримано розміри супергрануляції — 26 Мм. Пізніше в [86] під час детального дослідження доплерограм повного диска з використанням автокореляційного методу виявлено супергрануляцію розмірами  $31.2 \div 32.3$  Мм. У роботі [75] за допомогою методу мозаїки отримано типові розміри супергранул — 10.5 Мм в фотосфері і  $14 \div 26$  Мм у хромосфері, проте було зазначено вплив роздільної здатності апаратури на результати. Використавши статистичний тест, автори одержали найбільш можливий розмір супергранули у фотосфері та хромосфері — 25.9 Мм. На основі даних з SOHO/MDI у працях [28, 29] побудовано спектр потужності променевої швидкості з піком, що відповідає 36 Мм. Із використанням методу грануляційних треків у роботі [19] отримано дещо менший діаметр супергранули  $12 \div 20$  Мм, а в [49] знову більшу величину — 30 Мм (різні результати свідчать, вочевидь, про різну процедуру згладжування). Середній діаметр супергранули 27 Мм з піком розподілу 30 Мм одержано за даними локальної сейсмології в [20] і [17] та підтверджено в праці [35].

Тривалість життя супергрануляції є одним із ключових параметрів. В одному з ранніх досліджень [86] характерна тривалість життя визначена в межах  $50 \div 80$  годин. Автори також відзначили деякі комірки, що проіснували впродовж одного тижня. В роботі [75] знайдено, що тривалість життя супергранули залежить від розміру комірки і є більшою в більших супергранулах. Пізніше в [19] було зазначено, що більшість комірок зберігаються протягом 25 годин. У праці [17] встановлено середню тривалість життя супер-

гранул — 22.5 години; досліджено зв'язок між тривалістю життя і розміром комірок: для малих супергранул (менше 27 Мм) може спостерігатися майже лінійне зростання тривалості життя з розміром, для більших (понад 27 Мм) — середня тривалість життя практично незмінна (33 години). Це може бути пов'язане з утратою структурної когерентності для великих супергранул, що веде до фрагментації на менші частини. Останні дослідження [35] дають дещо довшу тривалість життя супергранул —  $1.6 \pm 0.7$  і  $1.8 \pm 0.9$  днів, залежно від використаного методу.

Внутрішнє поле швидкостей у супергранулах є майже горизонтальним, і його нелегко виміряти. В роботі [29] використано MDI доплерограми повного диска з урахуванням диференціального обертання, меридіональної циркуляції і р-мод, щоб усунути сонячні осциляції. Методом найменших квадратів визначено середню горизонтальну швидкість у супергрануляційних комірках —  $258 \pm 1$  м/с і вертикальну —  $29 \pm 2$  м/с. У праці [67] на основі спектрів потужності горизонтальної кінетичної енергії отримано  $V_{\lambda=36\text{Мм}} \approx 300$  м/с, що узгоджується з прямими вимірюваннями поля швидкостей на супергрануляційних масштабах за ефектом Доплера. Вертикальний складник швидкостей супергрануляції в сонячній фотосфері виділено та проаналізовано в праці [11].

Масштаб супергрануляційних рухів указує на те, що вони пов'язані зі значно глибшими шарами, ніж грануляція. Супергрануляцію можуть породжувати більші комірки конвекції, які виникають у зоні рекомбінації йонів гелію, що розміщена набагато глибше, ніж зона рекомбінації водню. У роботі [72] вперше припускається, що саме йонізація гелію відповідає за накопичення енергії на масштабах супергрануляції: прихована теплота рекомбінації  $\text{He}^{2+}$  в  $\text{He}^+$  на глибині 10 Мм під фотосферою може викликати в середовищі нестабільність, що приведе до рухів на масштабах, сумірних зі супергрануляцією. Проте в багатьох наступних працях ставиться під сумнів існування супергрануляції як окремої конвективної моди. У праці [51] уперше описано адвективний рух мезогранул у напрямку країв супергрануляції — показано відносну стабільність супергранул і рух мезогранул у напрямку супергрануляційних країв. У праці [71] проаналізовано високорозділені області континууму зі SOHO/MDI для дослідження еволюції мезо- і супергранул: адвекція мезогранул від центру до краю добре видима за час 45.5 год; тривалість життя мезогранул обмежена зверху часом транзиту з місця зародження всередині супергранули до краю — це  $4 \div 6$  год, залежно від супергрануляційних масштабів; багато мезогранул зникають перед тим, як вони дістануться краю і жодна не виживає, коли досягне його; швидкість адвекції  $500 \div 1000$  м/с. У праці [66] поверхневі властивості супергрануляції пояснюють нелінійною взаємодією між гранулами, яку спричиняють вибухаючі гранули. Переконливі підтвердження того, що мезогранули адвектуються супергранулами, знайдено у [20] з використанням SOHO/MDI доплерограм. У праці [46] досліджено, що адвективний рух мезогранул усередині

ні супергранул простежується для  $50 \div 70\%$  довгоживучих ( $\geq 4$  год) мезогранул, тоді як короткоживучі мезогранули рухаються неупорядковано. У праці [80] досліджено взаємозв'язок між рухами на супергрануляційних масштабах у сонячній фотосфері та великомасштабними потоками у верхніх шарах конвективної зони. У праці [49] визначено швидкість усередині супергрануляційних комірок як функцію їхніх розмірів. Результати роботи вказують на те, що супергрануляція є поверхневим явищем на Сонці, можливо, результатом великомасштабної нестабільності, приведеної в дію сильними корельованими висхідними потоками.

Останні роботи з моделювання, наприклад [36], підтверджують роль колективної взаємодії грануляційних потоків у формуванні мезогрануляційних, супергрануляційних і навіть більших масштабів конвекції. У роботі [85] припускається, що важливу роль у виділенні конвективних масштабів відіграє концентрація сильних магнітних трубок. Так будують локальні великомасштабні реалістичні моделі магнітодинамічної (МГД) конвекції, основані на формуванні й дослідженні магнітної сітки на мезо- і супергрануляційних масштабах [77, 85].

## V. ГІГАНТСЬКІ КОМІРКИ

Ще в ранній праці [73] висунуто припущення, що на Сонці існують гігантські комірки, які простягаються з основи конвективної зони до сонячної поверхні. Автори дослідили, що такі потоки у фотосфері Сонця мають переважно горизонтальну компоненту на масштабах близько 300 Мм з тривалістю життя більшою за один сонячний оберт. Водночас на Сонці неодноразово спостерігали подібні структури, які пов'язували з розподілом магнітних полів у сонячній фотосфері або ж диференціальним обертанням Сонця [30]. У праці [13] встановлено верхню межу для швидкостей у гігантських комірках близько 10 м/с. Для гігантських комірок із тривалістю життя понад декілька днів і масштабами  $80 \div 240$  Мм у роботі [14] виявлено невеликі фотосферні температурні варіації.

У [9] припущено, що ймовірне зменшення сил плавучості в глибоких шарах під сонячною фотосферою може спричиняти поле швидкостей гігантських масштабів. Очікувані середні значення таких швидкостей є приблизно на два порядки нижчими, ніж середні значення для грануляції чи амплітуди 5-хвилинних осциляцій. У результаті перші переважно зміщуються з шумом, згенерованим потоками малих масштабів, тому їх важко виявити.

Виявлення довгоживучих утворень великих масштабів стало можливим завдяки даним зі SOHO/MDI: у праці [28] помічено такі утворення на масштабах більших за 100 Мм. Утворення з характеристичними розмірами в 3–10 раз більшими, ніж розміри супергранул, із тривалістю життя більшою, ніж 10 днів, описані в роботі [50]: аналізуючи спектр потужності на MDI доплерограмах повного диска, автори дійшли висновку, що фізичне походження таких гігантських

комірок і супергранул однакове — гігантські комірки лише більші та стабільніші. Потоки на масштабах, більших від супергрануляції, виявляють із використанням методів локальної геліосейсмології [32].

Отже, гігантськими комірками називають величезні структури з регулярною конвективною швидкістю, які можуть бути виявлені у фотосфері. Припускається, що розміри таких конвективних комірок повинні бути близько 100 Мм, тривалість життя — понад тиждень і внутрішнє поле швидкостей очікується практично горизонтальним зі значеннями декілька метрів за секунду. Проте не знайдено очевидних фактів, які б чітко підтвердили існування конвективних комірок із такими параметрами і дали змогу якісно діагностувати ці рухи.

## VI. ВИСНОВКИ

Конвекція відіграє фундаментальну роль у перенесенні енергії з внутрішніх шарів Сонця. Різними методами спостережень й аналізу даних отримано багато результатів стосовно сонячної конвекції на різних просторових масштабах:

- Досліджено конвективні структури на грануляційних масштабах: проаналізовано фізичні характеристики грануляції (розміри  $\lambda \approx 0.5 \div 2.0$  Мм, тривалість життя  $t \approx 5 \div 16$  хв), тривалий час досліджують її структуру й динаміку; достатньо вивчена висотна стратифікація фізичних параметрів усередині грануляційних потоків: знайдено інверсію варіацій температури та вертикальної швидкості, асиметрію в їх розподілі всередині грануляційної комірки, дещо менше досліджено поле горизонтальних швидкостей; багато робіт присвячено еволюції грануляційних комірок і в окремому випадку — активним гранулам; досліджено залежність висоти проникнення грануляційних потоків у верхні шари від розмірів комірки, останнім часом зріс інтерес до вивчення впливу магнітних полів на грануляційну структуру.
- Від часу проведення перших робіт з конвекції проміжних масштабів на Сонці велика кількість спостережень виявляє в сонячній атмосфері структури, які відносять до мезогрануляції на масштабах  $\lambda \approx 4 \div 12$  Мм,  $t \approx 1 \div 5$  год. Тоді як усі ці спостереження не залишають сумніву щодо існування таких квазістаціонарних утворень, наявні результати відтворень не завжди узгоджені, а інколи й суперечливі. На сьогодні відмінність мезогрануляції від грануляції остаточно не підтверджена, але й не спростована. Такі суперечливі результати з виявлення мезогрануляції як окремого виду конвекції вимагають подальших досліджень з визначення просторово-часового розподілу температури, швидкості, тиску, магнітного поля на цих проміжних масштабах.

- Багато праць опубліковано щодо аналізу параметричних властивостей супергрануляційних комірок ( $\lambda \approx 20 \div 30$  Мм,  $t \approx 1$  доба). Достатньо вивчені горизонтальні потоки на супергрануляційних масштабах, однак лише частково досліджено вертикальну залежність фізичних параметрів потоку, вертикальну компоненту швидкостей усередині супергрануляційних комірок, зв'язки супергрануляції з магнітними полями.
- Неоднорідна структура фотосфери Сонця на гігантських масштабах (розміри — близько 100 Мм, тривалість життя — понад тиждень) досліджена недостатньо. Не знайдено очевидних фактів, які б чітко підтвердили існування гігантських комірок і дали змогу якісно діагностувати ці рухи.
- Тривалий час конвективні структури різних масштабів у сонячній фотосфері, що відповідають грануляції, мезо- і супергрануляції, досліджували здебільшого окремо. Останніми роками сонячну конвекцію почали розглядати як сукупність взаємодіючих і взаємопов'язаних

структур різних масштабів. Багато робіт присвячено вивченню так званих сімейств активних гранул — накладання менших (грануляційних) конвективних потоків на більші (мезогрануляційні і супергрануляційні). Сучасне МГД моделювання сонячної конвекції допомагає вивчити конвективні явища на сонячній поверхні з урахуванням магнітних полів.

Незважаючи на тривале дослідження сонячної конвекції, характер конвективного руху ще до кінця не вивчений. По сьогодні існує проблема коректного відтворення фізичних умов в атмосфері Сонця й відсутня однозначна інтерпретація даних спостережень. Тому дослідження варіацій фізичних параметрів сонячної конвекції за результатами сучасних спостережень усе ще актуальне. Потрібна розробка нових методів і вдосконалення наявних теоретичних підходів. Високе просторове розділення сучасних наземних і орбітальних телескопів дає нові можливості для вивчення неоднорідної структури сонячної фотосфери, що дозволить розв'язати низку важливих проблем сонячної конвекції.

- 
- [1] О. А. Баран, М. І. Стоділка, Кинем. физ. небес. тел **26**, 34 (2010).
- [2] Р. И. Костык, Астрон. журн. **62**, 112 (1985).
- [3] М. И. Стодилка, Кинем. физ. небес. тел **19**, 407 (2003).
- [4] М. И. Стодилка, О. А. Баран, С. З. Малинич, Кинем. физ. небес. тел **22**, 173 (2006).
- [5] М. И. Стодилка, О. А. Баран, Кинем. физ. небес. тел **24**, 99 (2008).
- [6] Н. И. Abdussamatov, А. G. Zlatopol'skii, Астрон. Lett. **23**, 752 (1997).
- [7] V. I. Abramenko *et al.*, Astrophys. J. Lett. **756**, L27 (2012).
- [8] M. Asplund, H.-G. Ludvig, A. Nordlund, R. F. Stein, Астрон. Astrophys. **359**, 669 (2000).
- [9] A. A. van Ballegoijen, Astrophys. J. **304**, 828 (1986).
- [10] О. А. Баран, Adv. Astron. Space Phys. **1**, 53 (2011).
- [11] О. А. Баран, Adv. Astron. Space Phys. **2**, 153 (2012).
- [12] P. N. Brandt, S. Ferguson, R. A. Shine, T. D. Tarbell, G. B. Scharmer, Астрон. Astrophys. **241**, 219 (1991).
- [13] T. M. Brown, P. A. Gilman, Astrophys. J. **286**, 804 (1984).
- [14] W.-H. Chiang, L. D. Petro, P. V. Foukal, Solar Phys. **110**, 129 (1987).
- [15] D.-Y. Chou, C.-S. Chen, K.-T. Ou, C.-C. Wang, Astrophys. J. **396**, 333 (1992).
- [16] W. R. Dawes, Mon. Not. R. Astron. Soc. **24**, 161 (1864).
- [17] D. Del Moro, F. Berrilli, T. L. Duvall, Jr., A. G. Kosovichev, Solar Phys. **221**, 23 (2004).
- [18] D. Del Moro, S. Giordano, F. Berrilli, Астрон. Astrophys. **472**, 599 (2007).
- [19] M. De Rosa, T. L. Duvall, Jr., J. Toomre, Solar Phys. **192**, 351 (2000).
- [20] M. L. De Rosa, J. Toomre, Astrophys. J. **616**, 1242 (2004).
- [21] F.-L. Deubner, Астрон. Astrophys. **216**, 259 (1989).
- [22] D. Dialetis, C. Macris, Th. Prokakis, E. Sarris, Астрон. Astrophys. **168**, 330 (1986).
- [23] D. Dravins, Астрон. Astrophys. **228**, 218 (1990).
- [24] O. Espagnet, R. Muller, T. Roudier, P. Mein, N. Mein, Астрон. Astrophys. Suppl. **109**, 79 (1995).
- [25] A. S. Gadun, S. K. Solanki, A. Johannesson, Астрон. Astrophys. **350**, 1018 (1999).
- [26] G. P. Ginet, G. W. Simon, Astrophys. J. **386**, 359 (1992).
- [27] N. Goldbaum, M. P. Rast, I. Ermolli, J. S. Sands, F. Berrilli, Astrophys. J. **707**, 67 (2009).
- [28] D. H. Hathaway *et al.*, J. Solar Phys. **193**, 299 (2000).
- [29] D. H. Hathaway, J. G. Beck, S. Han, J. Raymond, Solar Phys. **205**, 25 (2002).
- [30] A. B. Hart, Mon. Not. R. Astr. Soc. **114**, 17 (1954).
- [31] Herschel, W. Philos. Trans. R. Soc. London. **91**, 265 (1801).
- [32] B. W. Hindman *et al.*, Astrophys. J. **613**, 1253 (2004).
- [33] J. Hirzberger, J. A. Bonet, M. Vázquez, A. Hanslmeier, Astrophys. J. **527**, 405 (1999).
- [34] J. Hirzberger, Астрон. Astrophys. **392**, 1105 (2002).
- [35] J. Hirzberger, L. Gizon, S. K. Solanki, T. L. Duvall, Solar Phys. **251**, 417 (2008).
- [36] N. E. Hurlburt, M. L. DeRosa, K. C. Augustson, J. Toomre, Astronom. Soc. Pacific. Conf. Ser. **454**, 13 (2012).
- [37] J. Janssen, H. A. Deslandres, *Annales de l'Observatoire d'astronomie physique de Paris, sis Parc de Meudon (Seine-et-Oise, Paris, 1896)*.
- [38] R. Kariyappa, B. A. Varghese, W. Curdt, Астрон. Astrophys. **374**, 691 (2001).
- [39] V. N. Karpinsky, in *Proceedings of the 138th Symposium of the International Astronomical Union, held in Kiev (Kluwer, Dordrecht, 1989)*, p. 23.



- [40] I. Kawaguchi, *Solar Phys.* **65**, 207 (1980).
- [41] E. V. Khomenko *et al.*, *Astrophys. J. Lett.* **723**, L159 (2010).
- [42] R. I. Kostyk, N. G. Shchukina, *Astron. Rep.* **48**, 769 (2004).
- [43] R. Kostik, E. Khomenko, N. Shchukina, *Astron. Astrophys.* **506**, 1405 (2009).
- [44] R. Kostik, E. V. Khomenko, *Astron. Astrophys.* **545**, A22 (2012).
- [45] J. K. Lawrence, A. C. Cadavid, A. Ruzmaikin, *Solar Phys.* **202**, 27 (2001).
- [46] M. Leitzinger, P. N. Brandt, A. Hanslmeier, W. Potzi, J. Hirzberger, *Astron. Astrophys.* **444**, 245 (2005).
- [47] L. Matloch, R. Cameron, D. Schmitt, M. Schussler, *Astron. Astrophys.* **504**, 1041 (2009).
- [48] J. P. Mehlretter, *Astron. Astrophys.* **62**, 311 (1978).
- [49] N. Meunier, R. Tkaczuk, Th. Roudier, M. Rieutord, *Astron. Astrophys.* **461**, 1141 (2007).
- [50] R. Moore, D. Hathaway, E. Reichmann, *Bull. Am. Astronom. Soc.* **32**, 835 (2000).
- [51] R. Muller *et al.*, *Nature* **356**, 322 (1992).
- [52] D. A. N. Muller, O. Steiner, R. Schlichenmaier, P. N. Brandt, *Solar Phys.* **203**, 211 (2001).
- [53] O. Namba, *Astron. Astrophys.* **161**, 31 (1986).
- [54] G. Narayan, G. B. Scharmer, *Astron. Astrophys.* **524**, A3 (2010).
- [55] J. Nasmyth, *Astron. Reg.* **3**, 223 (1865).
- [56] A. Nesis *et al.*, *Astron. Astrophys.* **279**, 599 (1993).
- [57] A. Nordlund, R. F. Stein, M. Asplund, *Liv. Rev. Solar Phys.* **6** (2009).
- [58] L. J. November, J. Toomre, K. B. Gebbie, G. W. Simon, *Astrophys. J.* **245**, L123 (1981).
- [59] L. J. November, J. Toomre, K. B. Gebbie, G. W. Simon, *Astrophys. J.* **258**, 846 (1982).
- [60] L. J. November, *Solar Phys.* **154**, 1 (1994).
- [61] N. Oda, *Solar Phys.* **93**, 243 (1984).
- [62] W. Potzi, P. N. Brandt, A. Hanslmeier, *Hvar Observ. Bull.* **27**, 39 (2003).
- [63] K. Puschmann, B. Ruiz Cobo, M. Vazquez, J. A. Bonet, A. Hnsmeier, *Astron. Astrophys.* **441**, 1157 (2005).
- [64] M. P. Rast, *Astrophys. J.* **443**, 863 (1995).
- [65] M. P. Rast, *Astrophys. J.* **597**, 1200 (2003).
- [66] M. Rieutord, T. Roudier, J. M. Malherbe, F. Rincon, *Astron. Astrophys.* **357**, 1063 (2000).
- [67] M. Rieutord *et al.*, *Astron. Astrophys.* **512**, id.A4 (2010).
- [68] M. Rieutord, F. Rincon, *Liv. Rev. Solar Phys.* **7**, 2 (2010).
- [69] Th. Roudier, J. M. Malherbe, J. Vigneanu, B. Pfeiffer, *Astron. Astrophys.* **330**, 1136 (1998).
- [70] Th. Roudier, F. Lignières, M. Rieutord, P. N. Brandt, J. M. Malherbe, *Astron. Astrophys.* **409**, 299 (2003).
- [71] R. A. Shine, G. W. Simon, N. E. Hurlburt, *Solar Phys.* **193**, 313 (2000).
- [72] G. W. Simon, R. B. Leighton, *Astrophys. J.* **140**, 1120 (1964).
- [73] G. W. Simon, N. O. Weiss, *Z. Astrophys.* **69**, 435 (1968).
- [74] H. C. Spruit, A. Nordlund, A. M. Title, *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* **28**, 263 (1990).
- [75] R. Srikanth, J. Singh, K. P. Raju, *Astrophys. J.* **534**, 1008 (2000).
- [76] R. F. Stein, A. Nordlund, *Astrophys. J.* **499**, 914 (1998).
- [77] R. F. Stein, *Liv. Rev. Solar Phys.* **9**, 4 (2012).
- [78] T. Straus, D. Bonaccini, *Astron. Astrophys.* **324**, 704 (1997).
- [79] F. E. Stuart, J. H. Rush, *Astrophys. J.* **120**, 245 (1954).
- [80] M. Svanda, M. Klvana, M. Sobotka, A. G. Kosovichev, T. L. Duvall, *New Astronomy* **14**, 434 (2009).
- [81] A. M. Title, T. D. Tarbell, L. Acton, D. Duncan, G. W. Simon, *Sol. Phys.* **6**, 253 (1986).
- [82] A. M. Title, T. D. Tarbell, K. P. Topka, S. H. Ferguson, R. A. Shine, *Astrophys. J.* **336**, 475 (1989).
- [83] S. Ueno, R. Kitai, *Publ. Astron. Soc. Jpn* **50**, 125 (1998).
- [84] A. Z. Unsold, *Astrophys. J.* **1**, 138 (1930).
- [85] S. D. Ustyugov, *Astron. Spec. Pacific. Conf. Ser.* **416**, 427 (2009).
- [86] H. Wang, H. Zirin, *Solar Phys.* **120**, 1 (1989).
- [87] H. Wang, *Solar Phys.* **123**, 21 (1989).

## CONVECTION IN SOLAR ATMOSPHERE

O. A. Baran

*Astronomical Observatory of Ivan Franko National University of Lviv*  
 8, Kyryla i Mefodija St., Lviv, UA-79005, Ukraine e-mail: baran@astro.franko.lviv.ua

One of the most striking properties of solar convective motions at the solar surface is the existence of distinct cellular scales. At the present time, four different convective scales have been identified in the solar atmosphere in the increasing order of spatial size: granulation, mesogranulation, supergranulation and giant cells.

In this review we provide a detailed and extensive description of past and current research on the convective flows in the solar atmosphere on different spatio-temporal scales, including observation, theoretical works and numerical modelling of solar convection. We analyzed the most robust findings in the investigation of structure and dynamic of granulation and supergranulation and the attempts to select and research convection on mesogranular scales and giant cells.