

УДК 523.942

**О. А. Баран, М. І. Стоділка**

Астрономічна обсерваторія Львівського національного університету імені Івана Франка  
79005 Львів, вул. Кирила і Мефодія 8

### **Поле горизонтальних конвективних швидкостей за спостереженнями краю диска Сонця**

*Досліджено структуру горизонтальних конвективних потоків у сонячній атмосфері з використанням профілів лінії нейтрального заліза 532.42 нм, отриманих зі спостережень крайової зони сонячного диска з високим просторовим розділенням. Вивчено асиметрію лінії при переході до краю диска Сонця. Просторово-часові варіації швидкості відтворені з використанням методу  $\mu$ -метра. Хвильові рухи усунено шляхом  $k$ -фільтрації. Виділено конвективні потоки різних просторових масштабів: грануляції, мезо- і супергрануляції. Проаналізовано просторово-часовий розподіл конвективних швидкостей у фотосферних шарах і в області нижньої хромосфери: виявлено горизонтальні потоки грануляційних, мезо- і супергрануляційних масштабів вже на висотах  $h \approx 250$  км; горизонтальні швидкості грануляції і мезогрануляції збільшуються з висотою; у фотосферних шарах поле вертикальних швидкостей супергрануляції практично не змінюється, тоді як поле горизонтальних швидкостей може змінюватись з висотою. Виявлено асиметричний розподіл горизонтальної швидкості всередині великих конвективних потоків на грануляційних, мезо- і супергрануляційних масштабах.*

*ПОЛЕ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ КОНВЕКТИВНЫХ СКОРОСТЕЙ ПО НАБЛЮДЕНИЯМ КРАЯ ДИСКА СОЛНЦА, Баран О. А., Стоділка М. І. — Исследована структура горизонтальных конвективных потоков в солнечной атмосфере с использованием профилей линии нейтрального железа 532.42 нм, полученных из наблюдений края солнечного диска с высоким пространственным разрешением. Изучена асимметрия наблюдаемой линии при переходе к краю диска Солнца. Пространственно-временные вариации скорости воспроизведены с использованием метода  $\mu$ -метра. Волновые движения устранены с помощью  $k$ -фильтрации. Выделены конвективные потоки разных пространственных масштабов: грануляции, мезо- и супергрануляции.*

*Проанализировано пространственно-временное распределение конвективных скоростей в фотосферных слоях и в области нижней хромосферы: обнаружены горизонтальные потоки грануляционных, мезо- и супергрануляционных масштабов уже на высотах  $h \approx 250$  км, горизонтальные скорости грануляции и мезогрануляции увеличиваются с высотой; в фотосферных слоях поле вертикальных скоростей супергрануляции практически не изменяется, тогда как поле горизонтальных скоростей может изменяться с высотой. Обнаружено асимметричное распределение горизонтальной скорости внутри больших конвективных потоков на грануляционных, мезо- и супергрануляционных масштабах.*

*THE FIELD OF HORIZONTAL CONVECTIVE VELOCITIES FROM OBSERVATIONS ON THE SOLAR LIMB, by Baran O. A., Stodilka M. I. — We investigated the properties of the horizontal convective motions in the solar atmosphere using neutral iron line  $532.42$  nm profiles obtained at the solar limb with high spatial resolution. Asymmetry of the observed spectral line is studied when passing on to the limb. Space-time variations of the velocity were reproduced by the method of  $k$ -metre. Acoustic waves were removed by  $k$ -filtration. The existence of convective flows of distinct scales is detected: granulation, meso- and supergranulation. Space-time distribution of convective velocity in the photosphere layers and at the heights of the lower chromosphere is analyzed: horizontal flows of granulation, meso- and supergranulation scales are revealed even at height  $h \approx 250$  km; horizontal velocities of granulation and mesogranulation increase with the height; vertical velocities of the supergranules do not change practically in the photosphere layers, whereas horizontal velocities of the supergranules can be modified with height. We revealed the asymmetry in the distribution of horizontal velocities in the large convective flows of granulation, meso- and supergranulation.*

## ВСТУП

Рух речовини в атмосфері Сонця інтенсивно досліджується впродовж десятків років. Зібрано велику кількість спостережних даних про рух сонячної плазми, проте досі ми не маємо достатньо чітких уявлень про фізику фотосферних потоків та їхній зв'язок з процесами під видимою поверхнею та магнітними полями. Фізичні процеси, що відбуваються як в атмосфері Сонця, так і у підфотосферних шарах, можуть стати зрозумілішими завдяки детальному аналізу окремих структурних утворень в атмосфері Сонця.

Спостережуване поле швидкостей на Сонці зумовлене переважно двома типами рухів: 1) коливаннями і 2) потоками, спричиненими сонячною конвекцією [3]. Виділяють три види сонячної конвекції: грануляція, мезогрануляція і супергрануляція, основними відмінними ха-

раактеристиками яких є розміри, швидкість і час життя. Велику кількість робіт присвячено дослідженню флуктуацій інтенсивності і швидкості в гранулах, розподілу їх за розмірами і часом життя, варіацій фізичних параметрів в гранулах з висотою [6, 12, 13, 21, 25, 37]. Довгий час обговорюються розміри комірок супергрануляції, горизонтальні і радіальні швидкості, тривалість життя супергранул [9, 17, 26, 27, 30, 39]. Дослідження мезогрануляції розпочалось пізніше [28], тому останнім часом особливу увагу приділяють рухам саме цих масштабів [24, 29, 32].

Конвективні явища в атмосфері Сонця вважаються поверхневим проявом динаміки підфотосферних шарів. Класичним механізмом виникнення грануляції, мезо- і супергрануляції вважається виділення прихованої теплоти від іонізації водню чи гелію [10, 28]. Конвективну нестабільність спричиняють флуктуації густини в глибших шарах Сонця, сили плавучості витісняють теплі потоки речовини до поверхні у стабільні фотосферні шари, продукуючи різні утворення [35]. З іншого боку, грануляційну структуру розглядають як виключно поверхнєве явище, спричинене радіаційним охолодженням у фотосфері [37]. Припускають також, що мезо- і супергрануляція можуть утворюватись внаслідок нелінійної колективної взаємодії комірок грануляції, тобто є вторинним явищем [30, 31], або ж взагалі виявляють хвильову природу мезо- і супергрануляції [14, 38].

Згідно з даними [17] потужність фотосферної конвекції досягає максимуму на масштабах грануляції ( $l \approx 1000$ ) з наступним піком на  $l \approx 120$ , що відповідає супергрануляції; немає свідчень про наявність максимуму, котрий би відповідав мезогрануляції чи конвективним утворенням іншого розміру. Отже, утворення комірок з розміром, більшим від гранул і меншим від супергранул, є найбільш суперечливим явищем сонячної конвекції. Нечітко визначені базові характеристики мезогрануляції, такі як час життя, поле швидкостей чи радіальна товщина комірки. Крім того, фізично цікаві проблеми пов'язані із взаємодією горизонтальної та радіальної складових поля швидкостей на мезо-, супер- та грануляційних масштабах [33, 40].

Проникнення грануляції у високі шари атмосфери розглядають в основному на основі аналізу вертикальних швидкостей [6, 21]. В роботі [19] подано висотну залежність горизонтальної складової поля швидкостей малих масштабів до висоти  $h = 450$  км. Не вирішено в достатній мірі питання висотної залежності фізичних параметрів супергрануляції. Теорія вказує на проникнення конвективних рухів великих масштабів набагато вище в атмосферу Сонця, ніж для малих утворень: припускають, що супергрануляція здатна проникати принаймні у шари середньої хромосфери і що рухи добре корелюють з комірчастою структурою фотосфери [26]. В роботі [27] зроблено спробу аналітично пов'язати горизонтальну швидкість з вертикальною швидкістю, просторовими масштабами та висотою.

Незважаючи на велику кількість даних, характер конвективного руху ще до кінця не вивчений. Тому дослідження варіацій фізичних

параметрів сонячної конвекції за результатами сучасних спостережень залишається актуальним. Аналіз конвективних утворень різних масштабів дозволить глибше проникнути у фізику взаємодій гідродинамічних і температурних збурень, що мають місце в сонячній атмосфері, а також зрозуміти механізм переносу енергії з глибших шарів назовні.

Мета нашої роботи — за даними спостережень на краю диска Сонця з високим просторовим розділенням дослідити зміну асиметрії спектральної лінії нейтрального заліза; отримати просторово-часові варіації горизонтальної швидкості на різних масштабах. Для вивчення динаміки конвективних рухів в атмосфері Сонця ми виключаємо вплив акустичних коливань шляхом  $k$ -фільтрації просторово-часових варіацій відтворених величин.

### МЕТОДИКА ОБРОБКИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДАНИХ

Ми аналізуємо дані спостережень в лінії нейтрального заліза

532.42 нм, отриманих Н. Г. Щукіною на 70-см вакуумному баштовому телескопі VTT на Канарських островах в спокійних областях на краю диска Сонця. За час спостережень амплітуда тремтіння 0.35 сонячної поверхні на вхідній щілині спектрографа була сумірною з дифракційною роздільною здатністю телескопа (0.20 ) [3].

Довжина спостережуваної області становить 49 010 км, що відповідає від 0 до 0.37 (область на диску Сонця позначена жирною лінією на рис. 1). За край диска Сонця ми брали середину області з різким спадом інтенсивності.

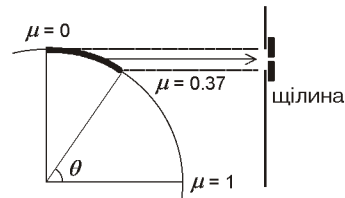


Рис. 1. Схема спостережень на краю диска Сонця

Ми маємо одночасні спостереження для різних положень на сонячному диску. Особливістю спостережень на краю сонячного диска є сильно виражена часова залежність отримуваних результатів [11]. Шляхом усереднення по часу ми отримали набір середніх профілів Fe I 532.42 нм для різних положень на краю диска Сонця. Оскільки час спостереження в нашому випадку менший за час життя гранул, то усереднена в часі залежність інтенсивності від положення на диску Сонця виявляє суттєві флуктуації (рис. 2, суцільна лінія). Апроксимація цієї залежності поліномами низьких порядків емулює додаткове просторове усереднення (рис. 2, пунктир). Як видно, при  $X < 50$  Мм внаслідок різкого зменшення просторового розділення структура не спостерігається. Користуючись спостережуваними та теоретичними

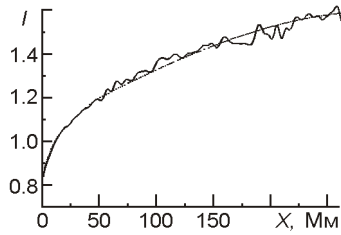


Рис. 2. Інтенсивність в континуумі після часового усереднення (суцільна крива) і після апроксимування (пунктир)

профілями, розрахованими у рамках моделі VAL80-C [41], за методикою [18] ми визначили істинний рівень континууму для різних положень на сонячному диску.

Для вивчення великомасштабних рухів газу, температурної структури атмосфери, динаміки сонячної і зоряної конвекції і грануляції потрібно досліджувати асиметрію спектральних ліній [1]. В роботі [22] відмічено, що асиметрію спектральних ліній можна також вважати мірою градієнтів швидкостей, але при цьому має виконуватись ряд умов; не можна забувати про труднощі прив'язки отриманих швидкостей до визначених глибин атмосфери.

Щоб описати асиметрію спостережуваної лінії, для кожного усередненого по часу профілю будується бісектор — геометричне місце середин хорд, що з'єднують точки контура з однаковою інтенсивністю. Він ділить профіль на дві частини з однаковими еквівалентними ширинами і показує променеву швидкість по всіх глибинах утворення лінії.

Положення центра фраунгоферової лінії теж залежить від точки спостереження на сонячному диску: в основному довжина хвилі, яка відповідає ядру лінії, збільшується при наближенні до краю (т. зв. лімб-ефект [16]). Оскільки ми не маємо прив'язки до довжин хвиль, то бісектор лінії визначаємо по відхиленню від усередненого по часу центра лінії.

Зміщення профілю свідчить про рухи речовини на поверхні Сонця: згідно з ефектом Доплера швидкість руху речовини дорівнює  $V = c \lambda' / \lambda_0$ . Променева швидкість складається із радіальної швидкості речовини  $V_r$  і горизонтальної швидкості  $V_{h1}$ , які дають проекцію на лінію зору. Друга складова горизонтального потоку  $V_{h2}$  орієнтована перпендикулярно до лінії зору і не дає вкладу в ефект Доплера [17]. Отже, променева швидкість в кожній точці  $(x, y)$  на диску Сонця визначається як  $V_{los}(x, y) = V_r(x, y)\cos \theta + V_{h1}(x, y)\sin \theta$ , де  $\theta$  — геліоцентричний кут від центра диска до точки  $(x, y)$  (рис. 1).

При наближенні до краю диска Сонця  $\cos \theta$  прямує до нуля, а  $\sin \theta$  — до одиниці, тобто збільшується вклад другого доданку, тому спостереження на краю диска дають можливість отримати горизонтальну складову швидкості  $(V_{los} - V_{h1})$ .

Для відтворення поля горизонтальних швидкостей руху речовини з даних спостережень ми використали метод  $\mu$ -метра, запропонований в роботі [36]. Суть методу, детально описаного в роботі [34], полягає у визначенні поля атмосферних швидкостей по асиметрії профілів спо-

стережуваних ліній. Положення кожної точки бісектора є результатом доплерівського зміщення, спричиненого нетепловими швидкостями в шарах, де сформована відповідна ділянка профілю. Спочатку ми визначили глибини утворення вибраної лінії в рамках моделі VAL80-C [41] для різних положень на диску Сонця. Це дозволило вибрати відповідні ділянки спостережуваних профілів, щоби отримати просторово-часовий розподіл швидкостей на заданій висоті. В результаті ми отримали варіації швидкостей на однаковій висоті при різних положеннях на сонячному диску.

Спостережні дані отримано з рівномірним кроком  $X = 252$  км вздовж диску Сонця. Для врахування сферичності спостережуваної області визначався крок між спостережуваними точками відповідно до положення на сонячному диску:

$$X_i = R \sqrt{(\cos \theta_{i+1} - \cos \theta_i)^2 + (\sin \theta_i - \sin \theta_{i+1})^2},$$

де  $R$  — радіус Сонця, а  $\theta_i$  і  $\theta_{i+1}$  — геліоцентричні кути від центра сонячного диска до  $i$ -ї та  $i+1$ -ї точок (рис. 1). Перехід до рівномірного кроку вздовж поверхні Сонця здійснено шляхом сплайн-інтерполяції. В результаті отримано область довжиною 262 800 км.

Структура атмосфери Сонця визначається як хвильовими, так і конвективними рухами, тому виникає задача їхнього коректного розділення. В нашій роботі розділення хвильових і конвективних рухів проведено з допомогою перетворення Фур'є [5]. Таке перетворення просторово-часових варіацій дозволяє з допомогою лінії  $\omega = v_s k_x$  або гіперконуса  $\omega^2 = v_s^2 (k_x^2 + k_y^2 + k_z^2)$  Лемба, де  $v_s$  — швидкість звуку, видалити хвильову складову. Области фур'є-образу  $\omega > v_s k_x$  відповідають звуковим коливанням, а області  $\omega < v_s k_x$  — конвективним рухам. Застосувавши до відповідно виділеної частини фур'є-образу обернене перетворення Фур'є, легко отримати просторово-часові варіації досліджуваних величин, викликані конвективними рухами.

## ОТРИМАНІ РЕЗУЛЬТАТИ

Ми провели неЛТР-синтез профілю лінії заліза в рамках моделі VAL80-C [41] для різних положень на диску Сонця; за функціями вкладу в емісію були отримані відповідні глибини утворення ядра лінії Fe I 532.42 нм і континууму.

Глибина утворення континууму відповідає висотам від  $h = 215$  км для  $F = 0.05$  (біля лімба), і опускається до висот  $h = 64$  км для  $F = 0.4$ . Отже, спостереження в континуумі охоплюють частково шари нижньої та середньої фотосфери.

Висота утворення ядра спостережуваної лінії заліза (рис. 3) складає від  $h = 607$  км на краю сонячного диска ( $F = 0.05$ ) до  $h = 530$  км для  $F = 0.4$ . Дані висоти відповідають областям температурного мініму-

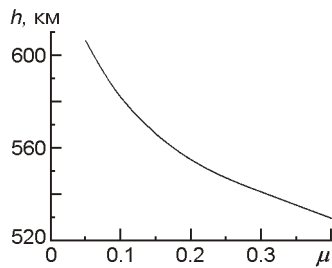


Рис. 3. Глибини утворення ядра лінії Fe I 532.42 нм

му і початку нижньої хромосфери.

Оскільки просторове розділення складає 252 км (0.35), то з урахуванням перспективи зображення просторове розділення на  $\mu = 0.07$ , якому відповідає  $X = 50$  Мм, становитиме 3.4 Мм, а просторове розділення на  $\mu = 0.14$  ( $X = 100$  Мм) складе 1.8 Мм. Таким чином, для  $X < 100$  Мм ( $\mu < 0.14$ ) просторове розділення недостатнє для вивчення грануляційних масштабів.

#### АСИМЕТРІЯ СПЕКТРАЛЬНИХ ЛІНІЙ

На рис. 4 подано бісектори спостережуваної лінії для різних положень на диску при наближенні до його краю:  $\mu = 0.3, 0.2$  і  $0.1$ . Без прив'язки до довжини хвилі виникають труднощі з визначенням напрямку відхилення бісектора, тому можемо аналізувати лише форму бісектора і відхилення його верхньої частини від найнижчої точки, котра збігається з центром лінії.

Як бачимо з рис. 4, найбільшим є вигин у бік коротких хвиль у верхній частині бісекторів ( $r > 0.8$ , де  $r$  — залишкова інтенсивність) — до 600 м/с і більше. При наближенні до краю сонячного диска відхилення верхньої частини бісектора залишається суттєвим.

Порівнюємо форму досліджуваних бісекторів на рівні  $r = 0.5 \dots 0.8$ . Видно, що відхилення центральної частини профілю становить 50 м/с у бік довгих хвиль для  $\mu = 0.37$  і 300 м/с для  $\mu = 0.1$ . Отже, при наближенні до лімба асиметрія істотно посилюється у центральній частині бісекторів.

Таким чином, проявляється деяка закономірність у зміні форми бісектора спектральних ліній при проходженні по диску. Про це ж свідчить аналіз 98 спектральних ліній у п'яти різних положеннях від

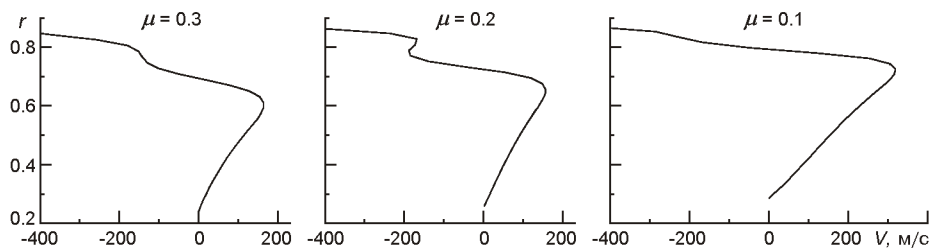


Рис. 4. Бісектори спектральної лінії Fe I 532.42 нм при наближенні до лімба

центра сонячного диска до краю, зроблений у роботі [15], а також емпіричні дані про асиметрію фраунгоферових ліній при переході від центра до краю, приведені в роботі [2]. В роботі [11] сформульовано висновок, що “С”-форма бісектора в центрі диска змінюється при переході до лімба. Дослідження бісектора лінії Fe I 630.15 нм [7], а також наші дослідження форми бісектора лінії Fe I 532.42 нм при переході до краю підтверджують попередні висновки.

Асиметрія досліджуваної лінії спричинена рухами речовини в області дослідження [21, 20, 23, 36]. Згідно з отриманими нами результатами на краю диска Сонця асиметрія досліджуваної лінії суттєва для всіх положень на краю диска Сонця, що свідчить про наявність структурних утворень різних масштабів на досліджуваних висотах.

### ПРОСТОРОВИЙ РОЗПОДІЛ ГОРИЗОНТАЛЬНИХ ШВИДКОСТЕЙ

Просторовий розподіл конвективної складової горизонтальних швидкостей руху речовини по поверхні Сонця з урахуванням сферичності представлено на рис. 5, а. Світлим тонам відповідають від’ємні, а темним — додатні зміни швидкості. Щоб краще передати контраст в даній області, діапазон зміни  $V$  ми обмежили значеннями 300 м/с; більшим значенням  $V$  відповідають крайні кольори.

Розподіл горизонтальної швидкості вздовж просторової координати в певний момент часу показано на рис. 5, б. Розміри неоднорідностей поля горизонтальних швидкостей змінюються від 15000 км і більше на краю диска Сонця до 1500 км при наближенні до центра. Причиною цих змін є різні значення висоти утворення лінії на різних віддаленнях від краю диска.

**Грануляція.** Грануляція є найбільш очевидним проявом конвективної нестабільності в атмосфері Сонця на масштабах 1000 км зі середнім часом життя 10 хв. Гранули — це комірки висхідних потоків гарячої речовини в нижніх фотосферних шарах, котрі проникають з конвективної зони, а з висотою розширюються і охолоджуються (через втрати на випромінювання), розтікаються в різні боки і опускаються вниз вздовж темних границь — міжгранул [8]. Найбільш цікавою є область температурного мінімуму, куди проникає лише частина гранул, як правило більших розмірів [6].

Ми виділили конвективні рухи, які відповідають масштабам грануляції (0...3 Мм). На рис. 6, а показано просторово-часовий розподіл швидкостей грануляційних масштабів на висоті  $h = 500$  км, а на рис. 6, б — просторові розподіли швидкості у фіксований момент часу, отримані по зміщенню центра спостережуваної лінії, а також для висот  $h = 250$  і 500 км. Середня ширина потоків 2.3 Мм. Конвективні швидкості грануляційних масштабів на  $X > 225$  Мм досить істотні: їхня амплітуда сягає 100 м/с на висотах  $h = 250$  км (штрихова крива)



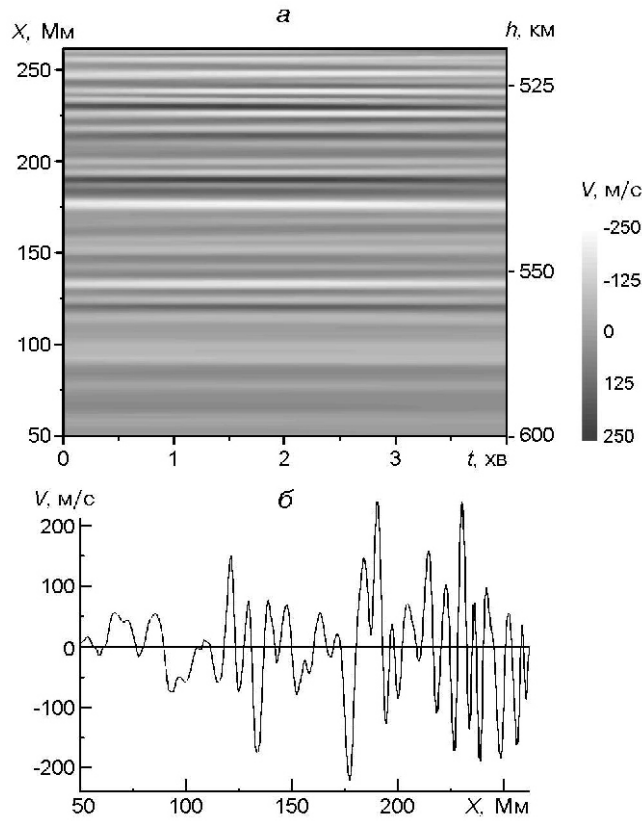


Рис. 5. Просторовий розподіл горизонтальних швидкостей (конвективна складова), отриманий по зміщенню центра лінії Fe I 532.42 нм: *a* — розподіл горизонтальних швидкостей за час спостереження; *б* — просторовий розподіл горизонтальних швидкостей у фіксований момент часу

або 70 м/с для  $h = 500$  км. Слід зазначити, що дана область відповідає положенню 0.3, тому отримані значення швидкостей визначаються вкладом як горизонтальної, так і вертикальної складових, про що свідчить, зокрема, зменшення амплітуди швидкості з висотою. При наближенні до лімба амплітуда швидкості на різних висотах помітно зменшується: для  $X < 175$  Мм швидкість набуває значень не більше 20 м/с. Для цієї області вертикальна складова мала, а отже, отримані швидкості відображають розподіл горизонтальних рухів конвективних потоків: з висотою амплітуда горизонтальної швидкості збільшується. Для  $X < 100$  Мм амплітуда швидкості практично нульова. Зниження варіацій швидкості на всіх досліджуваних висотах при наближенні до краю сонячного диска ( $X < 100$  Мм) зумовлене зменшенням просторового розділення.

Горизонтальна швидкість, отримана за зміщенням центра лінії, розподілена аналогічно (рис. 6, *б*, суцільна лінія): амплітуда горизонтальної швидкості зменшується від 80 м/с на  $X = 240$  Мм (це відповідає висотам  $h = 536$  км) до 20 м/с на  $X = 175$  Мм ( $h = 547$  км).

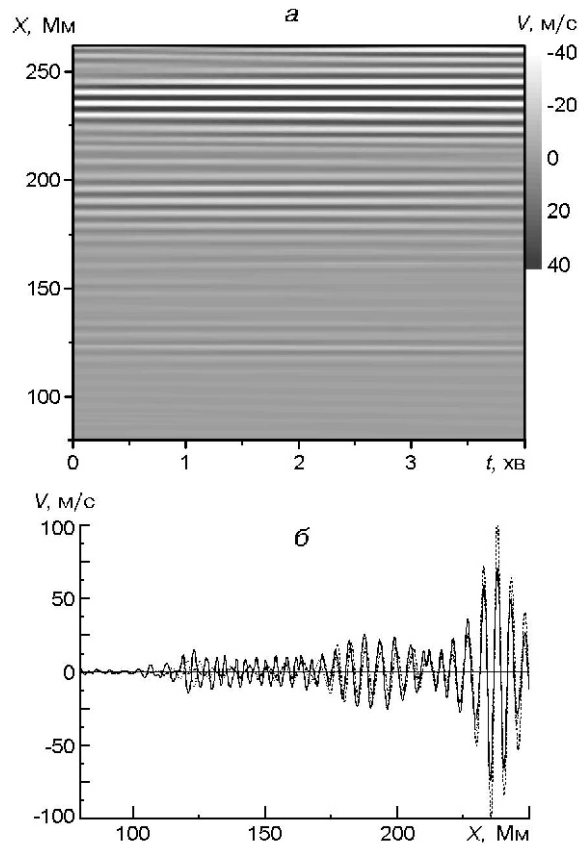


Рис. 6. Просторовий розподіл горизонтальних швидкостей на масштабах грануляції: *a* — розподіл горизонтальних швидкостей за час спостереження; *б* — просторовий розподіл горизонтальних швидкостей у фіксований момент часу, отриманий за зміщенням центра спостережуваної лінії (суцільна лінія), на висотах  $h = 250$  км (штрихова) і  $h = 500$  км (пунктир)

Для  $X < 100$  Мм, що відповідає спостережуваним висотам порядку 600 км, просторові варіації горизонтальних швидкостей на масштабах грануляції замиваються.

Отримані нами результати свідчать про наявність незначних горизонтальних швидкостей грануляційних масштабів вже на висотах  $h = 250$  км (нижні шари області проникної конвекції [4]). З висотою горизонтальні швидкості грануляції збільшуються.

**Мезогрануляція.** На протигагу грануляції, природу мезогрануляції до кінця ще не вивчено. Спочатку були виявлені і названі мезогрануляцією структури поля вертикальних швидкостей розміром 7000 км і часом життя до кількох годин [28], пізніше почали досліджувати горизонтальні швидкості мезогрануляційних масштабів [32, 40], зокрема відзначено тісний зв'язок між варіаціями горизонтальних і вертикальних швидкостей.

Вважають, що мезогрануляції відповідають конвективні утворення розміром від 3 до 10 Мм [24]. Відтворення горизонтальних швид-

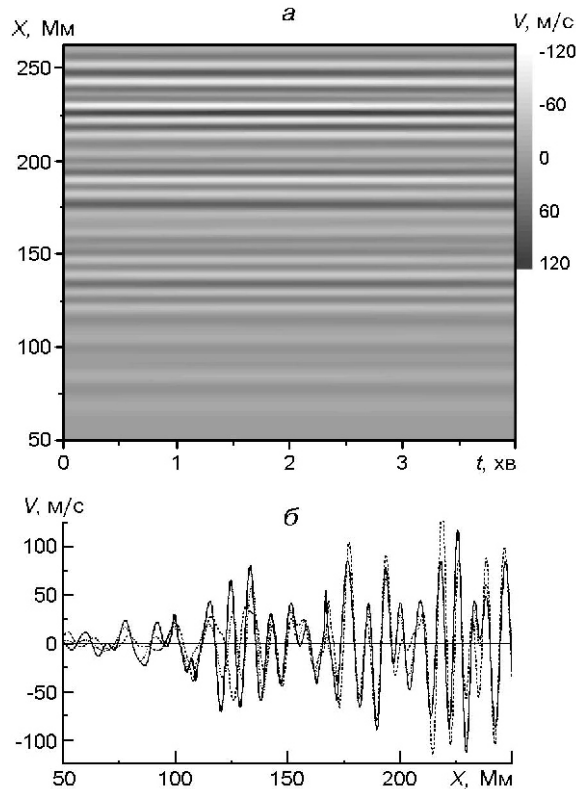


Рис. 7. Те ж для масштабів мезогрануляції

костей саме таких масштабів буде логічним доповненням до розподілу швидкостей на масштабах грануляції.

На рис. 7, *a* показано просторово-часовий розподіл горизонтальних швидкостей на масштабах мезогрануляції на висоті  $h = 500$  км, а рис. 7, *б* — залежності такого ж розподілу у фіксований момент часу, отримані по зміщенню центра спостережуваної лінії, а також для висот  $h = 250$  км і  $h = 500$  км. Виділені потоки розмірами 3...10 Мм, середній розмір мезогрануляційних структур 5.2 Мм.

На тій частині спостережуваної області, що ближче до центра сонячного диска ( $X > 215$  Мм), швидкість у мезогранулах набуває максимальних значень  $V = 120$  м/с для висот  $h = 500$  км; такою ж є швидкість, отримана по зміщенню центра лінії, що відповідає висотам  $h = 530...540$  км. Глибше, на висоті  $h = 250$  км, амплітуда швидкості дещо більша і сягає максимальних значень  $V = 145$  м/с, що свідчить про наявність як горизонтальної, так і вертикальної складових. При наближенні до лімба вертикальна складова швидкостей зникає, а отже, отримані швидкості відображають розподіл горизонтальних рухів конвективних потоків: аналогічно до грануляції, горизонтальні швидкості мезогрануляції, як правило, дещо більші у верхніх шарах. На краю сонячного диска для  $X < 75$  Мм горизонтальні швидкості на

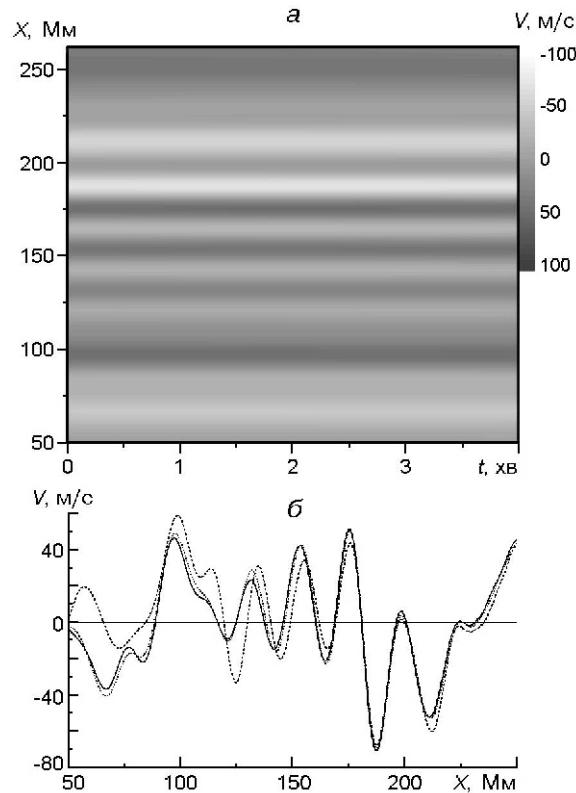


Рис. 8. Те ж для масштабів супергрануляції

мезогрануляційних масштабах набувають значень  $V < 15$  м/с, що викликане зменшенням просторового розділення.

Таким чином, аналогічно до грануляції, горизонтальні швидкості мезогрануляційних масштабів проявляються вже на висотах  $h = 250$  км (нижні шари області проникної конвекції [4]). З висотою горизонтальні швидкості мезогрануляції збільшуються.

**Супергрануляція.** Традиційно супергранули описують як великі конвективні утворення з горизонтальною швидкістю, направленою від центра комірки, і вертикальними потоками на її краях, тому горизонтальна швидкість супергрануляції добре проявляється при наближенні до лімба (ефект Доплера). Середній діаметр супергранул 20—30 Мм [9].

На рис. 8 відтворено просторово-часовий розподіл швидкостей на масштабах супергрануляції на висоті  $h = 500$  км і побудовано залежності такого ж розподілу в фіксований момент часу, отримані за зміщенням центра спостережуваної лінії, а також для висот  $h = 250$  км і  $h = 500$  км. Виділені потоки мають розміри 10...33 Мм, середній розмір — 17.3 Мм.

Як видно з рис. 8, б, супергранули чітко проявляються у варіаціях швидкостей на всіх досліджених висотах ( $h = 250$  і 500 км), а також у

розподілі швидкостей, отриманому по зміщенню центра лінії, що відповідає висотам  $h = 530...593$  км. Амплітуда швидкостей сягає 70 м/с. У фотосферних шарах поле вертикальних швидкостей супергрануляції практично не змінюється, чого не можна сказати про горизонтальні швидкості. Так, при наближенні до краю, де варіації швидкостей визначаються виключно горизонтальними швидкостями, швидкості супергранул на висотах 250 і 500 км відрізняються.

**Структура конвективних потоків.** На досліджуваній області горизонтальна швидкість у виділених нами гранулах (рис. 6, б) в основному розподілена симетрично відносно центра потоку, тобто максимум швидкості спостерігається у центральній частині. У широкому утворенні на  $X = 210...215$  Мм швидкість зменшується у центрі і збільшується при наближенні до країв з обох боків, тобто знайдено два максимуми швидкості всередині одного утворення розміром 5 Мм, причому така структура проявляється на всіх досліджуваних висотах. Ймовірно, в даному випадку проявляється тонка структура грануляційних потоків, правда, недостатньо висока просторова роздільна здатність призводить до її замивання.

Розглянемо структуру мезогрануляційних потоків (рис. 7, б). Всередині малих потоків мезогрануляції швидкість розподілена майже симетрично відносно центральної частини. Зі збільшенням розміру симетрія починає порушуватись. У великих мезогранулах спостерігається асиметрія розподілу швидкості: максимум швидкості зміщений убік, або ж наявні два максимуми швидкості і мінімум між ними. Прикладом асиметричного розподілу швидкості можуть бути великі потоки мезогрануляції на  $X = 102...113$  Мм і  $149...161$  Мм.

Аналогічно виглядає просторовий розподіл швидкостей в супергранулах (рис. 8, б). У менших супергранулах швидкість розподілена симетрично; у більших утвореннях, наприклад на  $X = 85...120$  Мм, спостерігаються два максимуми швидкості всередині потоку на висоті  $h = 250$  км, а вище, на  $h = 500$  км, швидкість має один максимум, зміщений до краю потоку, тобто з висотою відбувається зміна тонкої структури потоку. Значні варіації потоків супергрануляції в напрямку до краю комірки були виявлені в роботі [26].

## ВИСНОВКИ

На основі аналізу даних VTT-спостережень в лінії нейтрального заліза  $\lambda = 532.42$  нм з високим просторовим розділенням на краю диска Сонця ( $\mu = 0...0.37$ ) у діапазоні висот від області температурного мінімуму до початку нижньої хромосфери отримано такі результати.

1. Виявлено значну асиметрію лінії при наближенні спостережень до краю сонячного диска.

2. Методом  $\lambda$ -метра отримано просторово-часовий розподіл швидкостей руху речовини на краю диска Сонця. Шляхом  $k$ -фільтр-

рації просторово-часових варіацій швидкості виділено конвективну складову: по всій спостережуваній області проявляються значні варіації швидкості.

3. Вивчено поле швидкостей на масштабах грануляції, мезогрануляції і супергрануляції. Виявлено незначні горизонтальні швидкості грануляційних масштабів вже на висотах  $h \approx 250$  км (нижні шари області проникної конвекції), з висотою їхня амплітуда збільшується. Варіації горизонтальних швидкостей мезогрануляції теж проявляються на висотах  $h \approx 250$  км, і з висотою амплітуда швидкостей збільшується. У фотосферних шарах поле вертикальних швидкостей супергрануляції практично не змінюється, тоді як поле горизонтальних швидкостей може змінюватись з висотою: при наближенні до краю, де варіації швидкостей визначаються виключно горизонтальними швидкостями, швидкості супергранул на  $h = 250$  км і  $h = 500$  км відрізняються.

Спостерігається асиметричний розподіл горизонтальної швидкості всередині конвективних потоків.

Слід зазначити, що швидкість горизонтального потоку, визначена за ефектом Доплера, занижена через відсутність інформації про поперечну складову горизонтального потоку, тому реально слід очікувати значень, більших у  $\sqrt{2}$  разів [17].

Ми щиро вдячні Н. Г. Щукіній і Р. І. Костику за надані результати спостережень.

1. *Апрощенко И. Н., Гадун А. С., Гонасюк С. И. и др.* Вариации глобальных характеристик Солнца / Под ред. Э. А. Гуртовенко. — Киев: Наук. думка, 1991.—304 с.
2. *Апрощенко И. Н., Гадун А. С., Костык Р. И.* Тонкая структура фраунгоферовых линий: результаты наблюдений и интерпретация // Кинематика и физика небес. тел.—1990.—6, № 6.—С. 3—20.
3. *Костык Р. И., Щукина Н. Г.* Пятиминутные колебания и тонкая структура фотосферы Солнца. I // Кинематика и физика небес. тел.—1999.—15, № 1.—С. 25—37.
4. *Стодилка М. И.* Температурная структура реальной солнечной грануляции // Кинематика и физика небес. тел.—2003.—19, № 5.—С. 407—416.
5. *Стодилка М. И., Баран О. А.* Структура фотосферной конвекции Солнца на субгрануляционных масштабах // Кинематика и физика небес. тел.—2008.—24, № 2.—С. 99—109.
6. *Стодилка М. И., Баран О. А., Малинич С. З.* Особенности конвекции в фотосфере Солнца // Кинематика и физика небес. тел.—2006.—22, № 3.—С. 173—182.
7. *Adam M. G., Ibbetson P. A., Petford A. D.* The solar limb effect — Observations of line contours and line shifts // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.—1976.—177.—P. 687—708.
8. *Cheung M. C. M., Schüssler M., Moreno-Insertis F.* The origin of the reversed granulation in the solar photosphere // Astron. and Astrophys.—2007.—461, N 3.—P. 1163—1171.
9. *DeRosa M. L., Toomre J.* Evolution of solar supergranulation // Astrophys. J.—2004.—616, N 2.—P. 1242—1260.

10. *Deubner F.-L.* Mesogranulation — A convective phenomenon // *Astron. and Astrophys.*—1989.—**216**, N 1-2.—P. 259—264.
11. *Dravins D.* Photospheric spectrum line asymmetries and wavelength shifts // *Annu. Rev. Astron. and Astrophys.*—1982.—**2**.—P. 61—89.
12. *Espagnet O., Muller R., Roudier T., et al.* Penetration of the solar granulation into the photosphere: height dependence of intensity and velocity fluctuations // *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.*—1995.—**109**.—P. 79—108.
13. *Gadun A. S., Hanslmeier A., Pikalov K. N., et al.* Size-dependent properties of simulated 2-D solar granulation // *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.*—2000.—**146**.—P. 267—291.
14. *Gizon L., Duvall T. L., Schou J.* Wave-like properties of solar supergranulation // *Nature*.—2003.—**421**, N 6918.—P. 43—44.
15. *Gurtovenko E. A.* The total photospheric motion field // *Solar Phys.*—1975.—**45**, N 1.—P. 25—33.
16. *Halm J.* Über eine bisher unbekannte Verschiebung der fraunhoferschen Linien des Sonnenspektrums // *Astron. Nachr.*—1907.—**173**.—P. 273—288.
17. *Hathaway D. H., Beck J. G., Han S., Raymond J.* Radial flows in supergranules // *Solar Phys.*—2002.—**205**, N 1.—P. 25—38.
18. *Khomenko E. V., Kostik R. I., Shchukina N. G.* Five-minute oscillations above granules and intergranular lanes // *Astron. and Astrophys.*—2001.—**369**.—P. 660—671.
19. *Komm R., Mattig W., Nesis A.* The small-scale velocity field in the solar photosphere // *Astron. and Astrophys.*—1991.—**243**, N 1.—P. 251—262.
20. *Kostik R. I.* Fine structure of Fraunhofer lines and the structure of the solar atmosphere // *Soviet Astr. (tr: A. Zhurn.)*—1985.—**29**.—P. 65—71.
21. *Kostik R. I.* Fine structure of convective motions in the solar photosphere // *Kinematics and Physics of Celestial Bodies. Suppl.*—2005.—N 5.—P. 134—137.
22. *Marmolino C., Severino G.* The third central moment of photospheric lines as a measure of velocity gradients and line shifts // *Astron. and Astrophys.*—1981.—**100**, N 1.—P. 191—193.
23. *Marquez I., Bonet J. A., Vazquez M., Woehl H.* Numerical modelling of spectral line asymmetries in photospheric structures. I. Quiet Sun // *Astron. and Astrophys.*—1996.—**305**.—P. 305—316.
24. *Matloch L., Cameron R., Schmitt D., Schüssler M.* Solar mesogranulation as a cellular automaton effect // *Modern Solar Facilities — Advanced Solar Science.*—2007.—P. 339—342.
25. *Nordlund A., Stein R. F., Asplund M.* Solar surface convection // *Living Rev. in Solar Phys.*—2009.—**6**, № 2.
26. *November L. J.* The vertical component of the supergranular convection // *Astrophys. J.*—1989.—**344**, Sept. 1.—P. 494—503.
27. *November L. J.* Inferring the depth extent of the horizontal supergranular flow // *Solar Phys.*—1994.—**154**, N 1.—P. 1—17.
28. *November L. J., Toomre J., Gebbie K. B., Simon G. W.* The detection of mesogranulation on the Sun // *Astrophys. J.*—1981.—**245**, Part 2.—P. L123—L126.
29. *Ploner S. R. O., Solanki S. K., Gadun A. S.* Is solar mesogranulation a surface phenomenon? // *Astron. and Astrophys.*—2000.—**356**.—P. 1050—1054.
30. *Rast M. P.* The scales of granulation, mesogranulation, and supergranulation // *Astrophys. J.*—2003.—**597**, N 2.—P. 1200—1210.
31. *Rieutord M., Roudier T., Malherbe J. M., Rincon F.* On mesogranulation, network formation and supergranulation // *Astron. and Astrophys.*—2000.—**357**.—P. 1063—1072.

32. *Roudier Th., Malherbe J. M., Vigneau J., Pfeiffer B.* Solar mesogranule lifetime measurements // *Astron. and Astrophys.*—1998.—**330**.—P. 1136—1144.
33. *Roudier Th., Muller R.* Relation between families of granules, mesogranules and photospheric network // *Astron. and Astrophys.*—2004.—**419**.—P. 757—762.
34. *Shchukina N. G., Olshevsky V. L., Khomenko E.* Solar Ba II 4554 A line as Doppler diagnostics: NLTE analysis in 3D hydrodynamical model // eprint arXiv:0905.0985.—2009.
35. *Spruit H. C., Nordlund A., Title A. M.* Solar convection // *Annu. Rev. Astron. and Astrophys.*—1990.—**28**.—P. 263—301.
36. *Stebbins R., Goode P. R.* Waves in the solar photosphere // *Solar Phys.*—1987.—**110**, N 2.—P. 237—253.
37. *Stein R. F., Nordlund A.* Simulations of solar granulation. I. General properties // *Astrophys. J.*—1998.—**499**.—P. 914—933.
38. *Straus T., Bonaccini D.* Dynamics of the solar photosphere. I. Two-dimensional spectroscopy of mesoscale phenomena // *Astron. and Astrophys.*—1997.—**324**.—P. 704—712.
39. *Svanda M., Klnana M., Sobotka M.* Motions of supergranular structures on the solar surface // *Hvar Observatory Bulletin.*—2005.—**29**.—P. 39—48.
40. *Ueno S., Kitai R.* 3D velocity-field observation of solar convection I. Characteristics of mesogranulation // *Publs Astron. Soc. Jap.*—1998.—**50**.—P. 125—139.
41. *Vernazza J. E., Avrett E. H., Loeser R.* Structure of the solar chromosphere. III — Models of the EUV brightness components of the quiet-sun // *Astrophys. J. Suppl. Ser.*—1981.—**45**.—P. 635—725.

Надійшла до редакції 10.04.09