

doi: <https://doi.org/10.15407/kfnt2022.01.071>

УДК 523.942

Н. Г. Щукіна^{1,2,3}, Р. І. Костик¹

¹Головна астрономічна обсерваторія Національної академії наук України,
вул. Академіка Заболотного 27, Київ, Україна, 03143

²Астрономічна обсерваторія Київського національного університету ім. Тараса Шевченка,
вул. Обсерваторна, 3, Київ, Україна, 04053

³Астрономічна обсерваторія Львівського національного університету ім. Івана Франка,
вул. Кирила і Мефодія, 8, Львів, Україна, 79005

E-mails: shchukin@mao.kiev.ua

kostik@mao.kiev.ua

Результати спостережень хвильових рухів у сонячному факелі

Обговорюються результати спектрополяриметричних та фільтрових спостережень факельної ділянки в лініях Fe I 1564.3, Fe I 1565.8 нм, Ba II 455.4 нм та Ca II H 396.8 нм, отримані поблизу центра сонячного диска на німецькому вакуумному баштовому телескопі (о. Тенерифе, Іспанія). Показано, що зі збільшенням напруженості магнітного поля яскравість сонячного факела в центрі лінії Ca II H збільшується все повільніше, а потім починає зменшуватись. Причина такої поведінки яскравості факела — нелінійна залежність функції джерела цієї лінії від висоти, яка виникає через відхилення від локальної термодинамічної рівноваги. Показано, що хвилі, які рухаються як вгору, так і вниз, спостерігаються в різних ділянках факела незалежно від їхньої яскравості. При цьому в яскравих ділянках з сильним магнітним полем переважають хвилі, що рухаються вгору, а у менш яскравих ділянках зі слабким магнітним полем частіше спостерігаються хвилі, які рухаються вниз. Контраст факела в центрі лінії Ca II H корелює з потужністю коливань швидкості хвиль. В яскравих ділянках він збільшується зі збільшенням цієї потужності незалежно від напрямку поширення хвиль, а у місцях факела зі зменшеною яскравістю спостерігається протилежна залежність для обох типів хвиль. Потужність коливань швидкості в свою чергу чутлива до величини напруженості магнітного поля: у магнітних елементах факела з

підвищеною яскравістю що сильніше поле, то вищою є потужність коливань незалежно від напрямку поширення хвиль. У ділянках зі зменшеною яскравістю має місце зворотна залежність. Зроблено висновок, що збільшення контрасту зі збільшенням потужності коливань швидкості, які спостерігаються в яскравих ділянках факела, можна вважати свідченням того, що ці ділянки виглядають яскравими не тільки через ефект Вільсона, але і завдяки нагріванню сонячної плазми хвилями.

Ключові слова: сонячна активність, спектрально-поляризаційні спостереження, магнітні поля, термодинамічні умови, сонячні факели.

ВСТУП

Сонячні факели — це утворення на поверхні Сонця, які, як правило, обрамляють активні ділянки, і яскравість яких поступово збільшується з наближенням до лімба Сонця. Спостереження з високою просторовою роздільною здатністю показують, що факельні ділянки — це скупчення дрібних яскравих утворень, темних мікропор та грануляційних комірок [15, 24]. Вважається, що всі ці утворення є набором дрібномасштабних магнітних елементів (трубок) розмірами порядку сотні кілометрів та з напруженістю магнітного поля до 1...2 кГс [35].

Дослідження властивостей факельних ділянок є важливим з декількох причин. По-перше, факели, як більш яскраві утворення, ніж навколишні ділянки, можуть давати додатковий внесок в загальне сонячне випромінювання. Як наслідок, варіації яскравості факелів можуть призвести до варіацій світності Сонця, а значить, до зміни космічної погоди та до зміну клімату Землі. По-друге, оскільки факели є скупченнями магнітних елементів, є можливість відповісти на питання, як конвекція та хвилі взаємодіють з відносно сильним магнітним полем. З точки зору фізики такі знання мають особливу цінність при чисельному моделюванні магнітоконвекції. Нарешті, розуміння причин підвищеної яскравості факелів може бути корисним при вирішенні найбільш актуальної проблеми фізики Сонця, а саме, розуміння механізмів нагрівання хромосфери та корони [8, 13, 27, 33, 37]. Дотепер виконано досить багато досліджень факелів. Їхній огляд можна знайти в роботах [17—19] та в наших статтях у цьому журналі за 2013 р. (№ 1), 2019 р. (№ 6), 2020 р. (№ 4). В цілому ці роботи можна систематизувати таким чином.

Перш за все — це спостережні роботи, в яких особлива увага зверталась на зміни яскравості (контрасту) факелів при переході від центра до краю диска. В даний час встановлено [5, 10, 15, 19, 43, 45], що надлишкова яскравість факелів пов'язана з наявністю в них магнітних полів. Як наслідок, варіації центр — край їхньої яскравості є важливим джерелом інформації про структуру і властивості магнітних елементів у факельних областях. Слід відзначити, що відомості

про контраст факелів досить суперечливі. Якщо результати різних досліджень [9, 25, 43] про збільшення контрасту факелів від центра диска Сонця ($\mu = 1.0$) аж до положення $\mu = 0.2...0.4$ та про саму його величину добре узгоджуються між собою, то при спостереженнях на самому краю диска не має однозначної відповіді на питання, чи продовжує контраст збільшуватись чи, навпаки, починає зменшуватись.

Тривають дискусії про залежність контрасту факела від величини напруженості магнітного поля. З результатів спостережень, виконаних різними дослідниками, випливає, що на різних довжинах хвиль (неперервний спектр на довжині хвилі $\lambda = 500$ нм [42], далеке крило лінії Ba II 455.4 нм [17], лінії Ca II H і K [19], Ni I 676.8 нм, [41], Fe I 630.1 нм, Fe I 630.2 нм [23]) контраст факелів досягає максимуму при різних значеннях магнітного поля. При цьому залежності контрасту від магнітного поля у гранулах та міжгранулах досить сильно різняться. Так, згідно з результатами роботи Костика і Хоменко [17] контраст факельних міжгранульних проміжків зі збільшенням магнітного поля від 400 Гс до 1600 Гс залишається практично незмінним. Водночас контраст гранул з збільшенням поля зменшується.

Інший напрямок досліджень — вивчення тонкої структури факельних ділянок. Основні результати цих досліджень та огляд робіт, виконаних у цьому напрямку, можна знайти у вищеназваних наших публікаціях у цьому журналі, а також у працях [3, 17, 21, 24, 41]. Відомо, що наявність у факелах сильних магнітних полів призводить до модифікації конвекції. В результаті факели порівняно зі спокійною атмосферою стають більш структурованими, що спричиняє появу окремих яскравих точок (bright points), ланцюгів з цих точок (string), темних мікропор, стрічок (ribbons) та круглих квіткових структур (circular flower structures). При цьому конвективне поле швидкостей виявляється залежним від магнітного поля [3, 17, 24, 41], а мікротурбулентні процеси у верхній фотосфері та нижній хромосфері проявляються у вигляді дрібномаштабних рухів плазми.

Ще один напрямок досліджень факельних ділянок — вивчення в них спостережних хвильових рухів. Огляд робіт з цього напрямку можна знайти у публікаціях [1, 2, 4, 8, 18, 28, 33, 34, 37]. Нагадаємо, що згідно з даними Хоменко і Каллі [11, 12] в намагніченій сонячній атмосфері можуть збуджуватися три види МГД-хвиль: альвенівські, повільні та швидкі магнітоакустичні хвилі. При цьому низькочастотні МГД-хвилі можуть бути важливим джерелом енергії, а їхнє проникнення у хромосферу та подальша дисипація могли б спричинити нагрівання. Зауважимо, що, як правило, ці хвилі не можуть поширюватись з фотосфери у хромосферу, оскільки їхня частота виявляється меншою за граничну частоту у фотосфері $\omega_c = 5.2$ мГц. Але в ділянках, де фотосферне магнітне поле нахилене відносно вектора сили тяжіння, гранична частота може зменшитись [18, 20, 38]. В результаті хвилі з частотами, меншими за 5.2 мГц (період $P \approx 3$ хв), можуть проникати у верхні шари атмосфери. Підтвердження такого висновку впливає з

аналізу фільтрових, спектральних та спектрополяриметричних спостережень факельної ділянки, які були виконані Костиком і Хоменко [18, 20]. Згідно з цими дослідженнями максимум потужності коливань у фотосфері, температурному мінімумі та в середній хромосфері припадає на період $P \approx 5$ хв. На висоті утворення випромінювання в центрі лінії Ca II H добре помітний ще один період коливань $P \approx 11.7$ хв. Проникненню п'ятихвилинних коливань з фотосфери у хромосферу сприяють два фактори: нахил силових ліній магнітного поля та відхилення процесу поширення хвилі від адіабатичного. Максимальна потужність 5-хв коливань на висоті $h \approx 1600$ км припадає на кути нахилу магнітного поля в діапазоні $11 \dots 13^\circ$ та на зсув фаз $30 \dots 40^\circ$ між коливаннями температури та швидкості.

Поряд зі спостережними роботами, які згадувались вище, опубліковано досить багато теоретичних моделей факелів, мета яких пояснити різноманітні явища та процеси, що спостерігаються в цих утвореннях. Серед перших таких робіт слід згадати модель факела Спруїта [36] у вигляді магнітної трубки з гарячою стінкою (модель «hot wall»). Пізніше ця модель отримала розвиток в роботах кількох дослідників [26, 40, 43]. Виявилося, що моделі такого роду досить добре відтворюють такі властивості факелів, як яскравість (контраст) в неперервному спектрі та його варіації центр — край, а також залежність контрасту від напруженості магнітного поля. Інший клас моделей факелів — моделі магнітоконвекції, які почали розроблятися з 2004 р. [5, 10, 14, 45, 46].

Слід відмітити, що сьогодні ще залишається досить багато невирішених проблем, пов'язаних з інтерпретацією різноманітних явищ та процесів у факельних ділянках. Зокрема, в стадії дискусії залишається питання про причини їхньої підвищеної яскравості. Згідно з загальноприйнятою точкою зору [5, 10, 26, 36, 40, 43, 45] такою причиною є не вища температура в них (у порівнянні зі спокійною атмосферою), а ефект вільсонівської депресії, як це має місце в сонячних плямах [47]. Нагадаємо коротко його суть. У ділянках сонячної атмосфери з магнітним полем випромінювання виходить з більш глибоких, а значить, з більш гарячих шарів, ніж у спокійній атмосфері, де відсутні сильні магнітні поля, оскільки що більше магнітне поле, то менший газовий тиск і, як наслідок, на більшій геометричній глибині лежить шар газу, де оптична товщина досягає одиниці. Ще однією можливою причиною підвищеної яскравості факела деякі дослідники вважають реальне нагрівання факелів хвилями [1, 19, 34]. Детальну дискусію про роль хвиль у нагріванні верхніх шарів сонячної атмосфери можна знайти в роботах [2, 8, 19, 27, 33, 37].

Мета нашої роботи — проаналізувати властивості хвильових рухів в одній із спостережних факельних ділянок. Ми надіємось, що результати, отримані в цій роботі, можуть бути корисними для з'ясування ролі хвильових рухів у нагріванні сонячних факелів.

СПОСТЕРЕЖЕННЯ ТА ВХІДНІ ДАНІ

Ми використали результати спостережень факельної ділянки біля центра сонячного диска, які були отримані 13 листопада 2007 р. на німецькому вакуумному баштовому телескопі VTT Е. В. Хоменко разом зі співробітниками Інституту Астрофізики на Канарських островах. Нагадаємо, що телескоп встановлений в обсерваторії дель Тейде (del Teide) на о. Тенеріфе (Іспанія). Детальну інформацію про нього можна знайти в роботах [31, 44]. Умови спостережень, а також методика їхньої первинної обробки детально викладено в роботах [17—20]. Тут ми опишемо лише дані, використані в наших дослідженнях. Нагадаємо, що спостереження факельної ділянки велись одночасно в трьох спектральних діапазонах:

— спектрополяриметричні спостереження параметрів Стокса I , Q , U , V двох ліній нейтрального заліза Fe I 1564.8 і 1565.2 нм з часовою роздільною здатністю 6 хв 50 с, спектральною — 1.473 пм/пкл, просторовою — 0.185 /пкл. Вхідна щільність сканувала факельну ділянку з розмірами 5.5×84 . Ширина щілини дорівнювала 0.35. Ці спостереження були отримані за допомогою інфрачервоного поляриметра TIR-II [6];

— фільтрові спостереження у 37 ділянках профіля лінії іонізованого барію Ba II 455.4 нм з часовою роздільною здатністю 25.6 с, спектральною — 1.6 пм/пкл, просторовою — 0.089 /пкл. Поле зору фільтра становило 45.6×45.6 . Для цієї мети було використано спектрометр TESOS [44];

— фільтрові спостереження тільки в центрі лінії іонізованого кальцію Ca II H 396.8 нм з часовою роздільною здатністю — 4.9 с, просторовою — 0.123 /пкл. Поле зору фільтра становило 110×110 .

ОБРОБКА ДАНИХ СПОСТЕРЕЖЕНЬ

Ми знайшли значення напруженості магнітного поля та кута нахилу його силових ліній на висоті утворення випромінювання в далеких крилах ліній Fe I 1564.8 та 1565.2 нм шляхом інверсії профілів параметрів Стокса I , Q , U , V цих ліній. Розрахунки велись за допомогою інверсійної програми SIR (Stokes Inversion based on Responce functions) [30], яку нам люб'язно передали співробітники Інституту Астрофізики на Канарських островах. За початкове наближення була використана гарвардсько-смітсоніанська стандартна модель атмосфери Сонця HRSA [7]. Магнітне поле в кожному пікселі вважалось однокомпонентним та постійним по висоті. Отримані напруженості магнітного поля в нижній фотосфері факельної ділянки (в середньому на висоті $h = -100$ км) перебували у межах 270...1700 Гс.

Варіації швидкості, зумовлені конвективними та хвильовими рухами, були знайдені з контурів лінії іонізованого барію Ba II 455.4 нм

за допомогою «лямбда-метр-методу» [32, 39]. Цей метод оснований на припущенні, що лінія барію утворюється в оптично тонкому шарі. Згідно з даними Стеббінса і Гуде [39] зміщення кожної точки бісектора, що відповідає ширині контура лінії, є результатом доплерівського зсуву коефіцієнта поглинання цієї лінії, зумовленого нетепловою швидкістю в шарі, де він утворюється. Рухаючись до все менших значень, ми зміщуємось до все більшої висоти в атмосфері Сонця, що дає можливість отримати варіації поля швидкостей з висотою. Згідно з даними Щукіної, Ольшевського і Хоменко [32] лінія Ba II 455.4 нм утворюється у межах від $h = 0$ км (фотосфера) і до $h = 650$ км (область температурного мінімуму).

Для того щоб розділити конвективну та хвильову складові флуктуацій швидкості, ми побудували k -діаграму, на якій потужність цих флуктуацій представлена в залежності від часової частоти та просторового хвильового числа k . Методику такого розділення описано в роботі [16]. Як ми уже відмічали вище, максимум потужності коливань у фотосфері, в температурному мінімумі та в середній хромосфері припадає на частоту коливань 3.3 мГц (період $P = 5$ хв). На висоті утворення випромінювання в центрі лінії Ca II H добре помітно ще одну частоту 1.4 мГц ($P = 11.7$ хв).

Для подальших досліджень ми використали такі спостережні величини:

— напруженість магнітного поля та кут нахилу його силових ліній (відносно променя зору) на висоті утворення неперервного спектру біля ліній Fe I 1564.8 і 1565.2 нм (нижня фотосфера, $h = -100$ км);

— хвильові швидкості на 14 висотах в атмосфері Сонця, де утворюється випромінювання в спектральній лінії Ba II 455.4 нм ($h = 0 \dots 650$ км) та розраховані на їхній основі зсуви фаз (V, V) між коливаннями швидкості V у фотосфері на висоті формування випромінювання в далекому крилі цієї лінії ($h = 0$ км) і коливаннями швидкості в температурному мінімумі на висоті утворення випромінювання поблизу її центра ($h = 650$ км);

— контраст (яскравість) факельної ділянки на висоті утворення випромінювання центра лінії Ca II H 396.8 нм. Згідно з даними робіт [22, 29] ця висота у випадку плоскопаралельної одновимірної моделі атмосфери спокійного Сонця коливається у межах $h = 1600 \dots 2200$ км;

— потужність коливань швидкості хвилі на висоті утворення випромінювання в центрі лінії Ba II 455.4 нм ($h = 650$ км).

Розмір ділянки, у межах якої велись дослідження хвильових рухів, становив 5.5×18.5 . При цьому загальна кількість пікселів в ній дорівнювала 15–100. Зауважимо, що для хвиль, які рухаються з фотосфери у хромосферу, зсуви фаз від'ємні ($(V, V) < 0$), а для хвиль, які рухаються у протилежному напрямку — додатні ($(V, V) > 0$). Потужність коливань виражено в умовних одиницях. Її величина пропорційна квадрату швидкості хвилі, а контраст (яскравість) факельної ділян-

ки дорівнює інтенсивності випромінювання I_0 в центрі лінії Ca II H, поділену на середню інтенсивність випромінювання I_{quiet} у спокійній атмосфері Сонця.

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХНЕ ОБГОВОРЕННЯ

Мета цього розділу — описати деякі спостережні властивості факельної ділянки, які можуть бути корисними при обговоренні причин її підвищеної яскравості. Зокрема, ми звернемо увагу на особливості залежності яскравості факела в центрі лінії Ca II H від напруженості магнітного поля. Крім цього, ми дослідимо кореляцію яскравості факела з такими параметрами хвильових рухів, як зсув фаз $F(V, V)$ та потужність коливань швидкості хвилі.

Залежність контрасту факела від магнітного поля. На рис. 1 ми приводимо діаграму розсіювання контрасту (яскравості) в центрі лінії Ca II H в залежності від напруженості магнітного поля B та кута нахилу магнітних силових ліній у нижній фотосфері ($h = -100$ км). Середні значення контрасту в кожному інтервалі $B \pm B/2$, в яких міститься однакова кількість точок, на рис. 1 показано світлими кружками. Їхній розмір пропорційний куту нахилу магнітних силових ліній в цьому інтервалі. Згладжені значення контрасту для всього діапазону напруженостей магнітного поля на рис. 1 представлені поліномом четвертого степеня (суцільна лінія).

Як видно, залежність контрасту від магнітного поля має нелінійний характер. Особливо це помітно в ділянках з великими значеннями B . Там контраст факела зі збільшенням напруженості магнітного поля збільшується значно повільніше, ніж у ділянках, де напруженість B магнітного поля менша за 1200 Гс. При цьому найяскравішими виглядають ті факельні ділянки, де напруженість магнітного поля близька до 1400 Гс, а нахил магнітних силових ліній невеликий ($\approx 12^\circ$). Цікаво, що подальше посилення поля призводить не до збільшення, а до зменшення яскравості факела. В середньому напруженість поля в областях факела, контраст яких перевищує середнє значення $I_0 / I_{quiet} = 1.464$, майже удвічі більша, ніж у ділянках, де яскравість менша за середнє значення. З рис. 1 також видно, що контраст залежить не тільки від величини B , але і від кута нахилу магнітних силових ліній: він збільшується зі зменшенням цього кута. У ділянках, де контраст нижчий за середнє значення, кут нахилу магнітних силових ліній зменшується з 70° до 20° зі збільшенням напруженості магнітного поля B . Водночас там, де контраст вищий від середнього значення, нахил поля невеликий і лежить у межах $16^\circ \dots 12^\circ$.

В роботі [21] розглядалися кілька можливих причин поведінки контрасту і було зроблено висновок, що в ділянках з великими значеннями B така поведінка зумовлена, найімовірніше, зменшенням по абсолютній величині зсувів фаз хвилі ($F(V, V) < 0$), яка поширюється

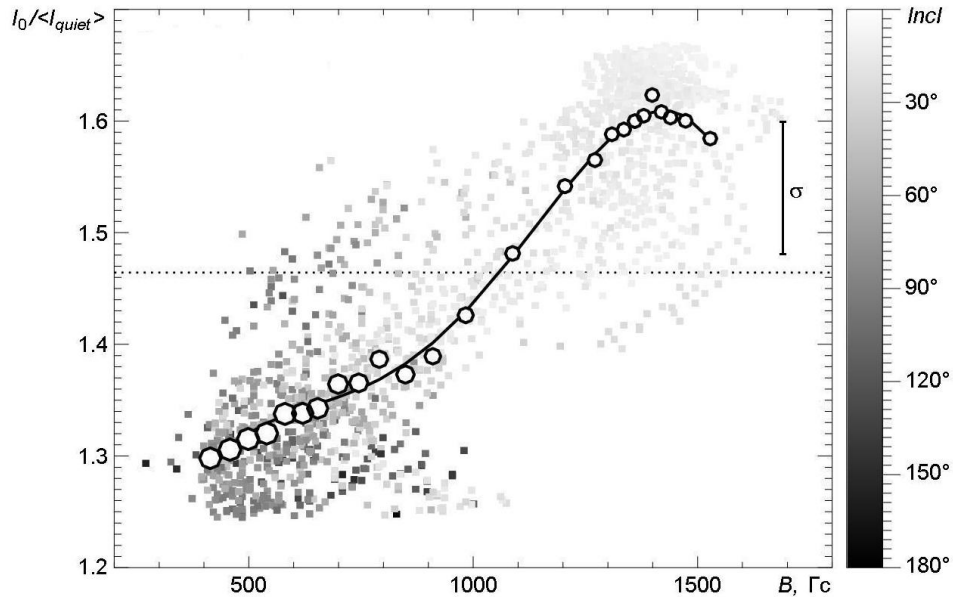


Рис. 1. Двовимірне представлення контрасту I_0 / I_{quiet} (квадратики) у центрі лінії Ca II Н як функції напруженості фотосферного магнітного поля B та кута $Incl$ нахилу магнітних силових ліній на висоті $h = 100$ км. Світлішим квадратам відповідає менший нахил магнітних силових ліній. Кружки — середні значення контрасту в інтервалах B , що містять однакову кількість пікселів; суцільна лінія — їхня апроксимація поліномом четвертого степеня; розміри кружків пропорційні кутам нахилу поля. Горизонтальний пунктир — просторово усереднене значення контрасту $I_0 / I_{quiet} = 1.464$. Для ділянок з контрастом, більшим за цю величину, середні значення параметрів дорівнюють: $I_0 / I_{quiet} = 1.587$, $B = 1322$ Гс, $Incl = 16^\circ$, частка площі, яку займають ці ділянки, $No = 49.4\%$. Для ділянок з контрастом, меншим за 1.464, середні значення $I_0 / I_{quiet} = 1.343$, $B = 701$ Гс, $Incl = 56^\circ$, $No = 50.6\%$. Стандартне відхилення контрасту отримано усередненням по всіх інтервалах B . Приведено величини для всього діапазону нахилів поля ($0^\circ \dots 180^\circ$) та зсувів фаз хвилі ($-36^\circ < (V, V) < 49^\circ$)

вгору з фотосфери у хромосферу. Відзначимо, що зменшення контрасту при малих значеннях (V, V) очікуване, оскільки при зсувах фаз, близьких до нуля, хвиля перетворюється у стоячу і не переносить енергії з фотосфери у хромосферу. Рис. 2 підтверджує сказане. На ньому ми показуємо діаграму розсіяння зсувів фаз хвилі (V, V) в залежності від величини напруженості магнітного поля B та контрасту I_0 / I_{quiet} у центрі лінії Ca II 396.8 нм. Як видно, при значеннях напруженості магнітного поля у межах 1350...1600 Гс зсув фаз хвиль, які поширюються вгору, близькі до нуля і, як наслідок, контраст перестає збільшуватись.

В цій роботі ми хочемо показати ще на одну можливу причину нелінійної залежності контрасту I_0 / I_{quiet} від напруженості магнітного поля B , яку ми отримали з фільтрових спостережень факельної ділянки в центрі лінії Ca II Н. Ця причина полягає у нелінійній залежності функції джерела S_0 цієї лінії від висоти h .

Згідно із різноманітними дослідженнями (див., наприклад, класичні роботи Лінскі і Евретта [22], Резаї та ін. [29]) при діагностиці

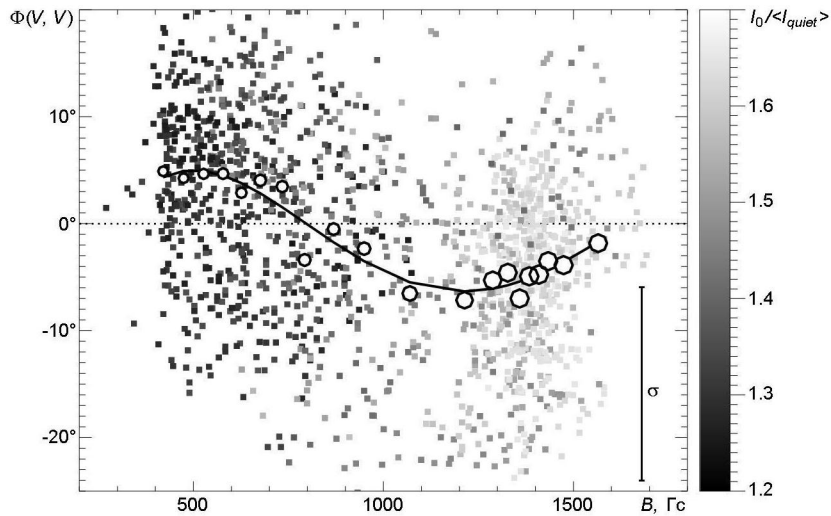


Рис. 2. Двовимірне представлення зсуву фаз хвилі (V, V) від напруженості магнітного поля та контрасту I_0/I_{quiet} в центрі лінії Ca II H. Квадратики — значення (V, V) та B в кожному пікселі факельної ділянки. Градаціями сірого позначено контраст: світлішим квадратикам відповідають більші значення I_0/I_{quiet} . Світлі кружки — середні значення зсувів фаз в інтервалах B з однаковою кількістю пікселів. Розміри кружків пропорційні значенням контрасту; суцільна лінія — згладжені значення зсувів фаз для всього спостережуваного діапазону напруженостей магнітного поля

ліній Ca II H і K необхідно брати до уваги, що в сонячній атмосфері гіпотеза локальної термодинамічної рівноваги (ЛТР) для цих ліній не виконується. Зокрема, моделювання умов формування ліній Ca II H і K у спокійних ділянках Сонця з врахуванням відхилення від ЛТР (т. з. НЛТР) показує, що функція джерела S_0 на частоті центра цих ліній збігається з функцією Планка тільки у фотосфері. Починаючи з області температурного мінімуму і вище, вона все більше і більше відхиляється від функції Планка, залишаючись завжди меншою від неї (див. рис. 13 в роботі [22]). При цьому функція джерела досягає значень, близьких до максимальних на висотах 1000 км, а потім починає монотонно зменшуватись.

Для того щоб дослідити функцію джерела S_0 лінії Ca II H на різних висотах у факельній ділянці, ми перетворили залежність контрасту I_0/I_{quiet} від напруженості магнітного поля B , представлену на рис. 1, у залежність I_0/I_{quiet} від висоти h утворення випромінювання I_0 . Таку залежність можна отримати, якщо врахувати, що в результаті ефекту Вільсона в ділянках з сильним магнітним полем випромінювання повинно виходити із глибших шарів, ніж там, де це поле слабе. Виходячи з даних рис. 13 з роботи [22], ми припустили, що у магнітних елементах факельної ділянки з мінімальною напруженістю магнітного поля ($B_1 = 200$ Гс) шар, з якого виходить випромінювання в лінії Ca II H, лежить на висоті $h_1 = 2500$ км. У магнітних елементах з найбільшим полем ($B_0 = 1800$ Гс) цей шар розташовується значно глибше

($h_0 = 600$ км). Виходячи з цього припущення, ми розраховували висоти h для всіх отриманих в нашій роботі значень B за допомогою простої інтерполяційної формули

$$h = h_0 + (B - B_0) \frac{h_1 - h_0}{B_1 - B_0}.$$

Потрібно відзначити, що вибрані нами значення висот h_0 та h_1 належать до спокійної атмосфери Сонця. У факелах діапазон висот, на яких потрібно досліджувати поведінку функції джерела в лінії Ca II H, може дуже відрізнятись, але це не повинно вплинути на характер залежності $S_0(h)$.

Ми розуміємо обмеженість нашого підходу для визначення області формування випромінювання I_0 в різних магнітних елементах факельної ділянки, але його використання виправдане тим, що дозволяє отримати уявлення про відносне розміщення по висоті різних шарів, з яких виходить випромінювання в центрі лінії Ca II H.

На рис. 3 ми показуємо, як змінюється контраст I_0 / I_{quiet} в центрі лінії Ca II H в залежності від висоти h формування випромінювання I_0 в різних факельних ділянках. Як видно, випромінювання в ділянках факела з підвищеною яскравістю ($I_0 / I_{quiet} > I_0 / I_{quiet}$) виходить в середньому зі значно глибших хромосферних шарів порівняно з ділян-

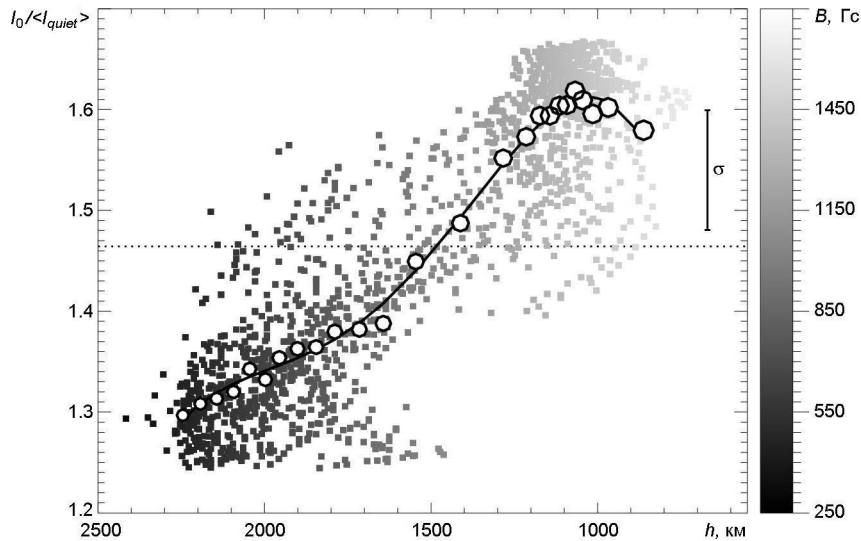


Рис. 3. Двовимірне представлення контрасту I_0 / I_{quiet} в центрі лінії Ca II H як функції висоти h формування випромінювання I_0 та напруженості фотосферного магнітного поля B . Квадратики — значення I_0 / I_{quiet} і h в кожному пікселі факельної ділянки. Величину поля B подано градаціями сірого — світлішим квадратикам відповідають більші значення B . Круги — середні значення контрасту в інтервалах h , в яких міститься однакова кількість пікселів; суцільна лінія — їхня апроксимація поліномом четвертого степеня; розміри кружків пропорційні напруженості магнітного поля. Для ділянок з контрастом, більшим від середнього $I_0 / I_{quiet} > 1.464$, середнє значення висоти формування випромінювання Ca II H дорівнює $h = 1166$ км, для ділянок з контрастом, меншим від 1.464, $h = 1904$ км

ками зі зменшеною яскравістю ($I_0 / I_{quiet} < I_0 / I_{quiet}$). Приведені на цьому рисунку згладжені значення контрасту (суцільна лінія) можна розглядати як згладжені значення функції джерела S_0 цієї лінії, нормовані до середньої інтенсивності випромінювання I_{quiet} у спокійній атмосфері Сонця, якщо зробити припущення, що досліджувана факельна ділянка в центрі лінії Ca II H є оптично тонкою. В такому випадку повинно виконуватись наближення Мілна — Еддінгтона, відповідно до якого інтенсивність випромінювання I_0 буде дорівнювати функції джерела S_0 на висоті, де оптична глибина в конкретній частоті дорівнює одиниці. Очевидно, що з фізичної точки зору наближення Мілна — Еддінгтона є ідеалізацією процесу утворення лінії Ca II H, але в нашому випадку воно дає можливість описати хоча б якісно поведінку з висотою функції джерела цієї лінії у факельних ділянках.

Результати на рис. 3 свідчать про те, що тут, як і в спокійній атмосфері Сонця [22, 29], залежність функції джерела від висоти має нелінійний характер. Саме ця особливість і є, найімовірніше, однією з основних причин нелінійної залежності контрасту факела від напруженості магнітного поля, показаної на рис. 1.

Залежність яскравості факела від зсуву фаз. Результати, представлені на рис. 2, показують, що в середньому (суцільна лінія) яскравість факела, яка спостерігається в центрі лінії Ca II H, залежить не тільки від напруженості магнітного поля, але і від напрямку поширення хвилі. Цей висновок добре узгоджується з більш ранніми результатами, викладеними в роботі Костика і Хоменко [19]. Більш детальне уявлення про таку залежність дають рис. 4 і 5. Зокрема, на рис. 4 ми показуємо діаграму розсіювання контрасту I_0 / I_{quiet} в центрі лінії Ca II H в залежності від зсуву фаз хвилі (V, V) та напруженості магнітного поля B , а на рис. 5 — дві гістограми розподілу контрасту. Одна з них побудована для ділянок факела, в яких хвилі поширюються вгору ($(V, V) < 0$, суцільна лінія), а інша — для ділянок, де хвилі рухаються вниз ($(V, V) > 0$, штрих-пунктирна лінія). Цікаво, що перші зустрічаються у факельних ділянках частіше, ніж другі (рис. 5).

Кидається у вічі великий розкид значень контрасту на рис. 4 для одного і того ж значення зсуву фаз. Видно, що хвилі, які поширюються вгору з фотосфери у хромосферу, можуть спостерігатись як у місцях з підвищеною ($I_0 / I_{quiet} > I_0 / I_{quiet}$), так і у місцях зі зменшеною яскравістю. Аналогічна картина має місце і для хвиль, які поширюються у протилежному напрямку. Доля яскравих ділянок, де хвилі поширюються вгору, дещо більша, ніж ділянок, де хвилі рухаються вниз (рис. 5). Останні надають перевагу темнішим ділянкам факела, але можуть спостерігатись і у яскравіших ділянках, що правда зі значно меншою ймовірністю. При просторовому усередненні (суцільна лінія на рис. 4) ділянки факела, де спостерігається хвиля, поширювана з фотосфери у хромосферу, будуть в середньому виглядати яскравішими від ділянок, де хвиля поширюється у зворотному напрямку.

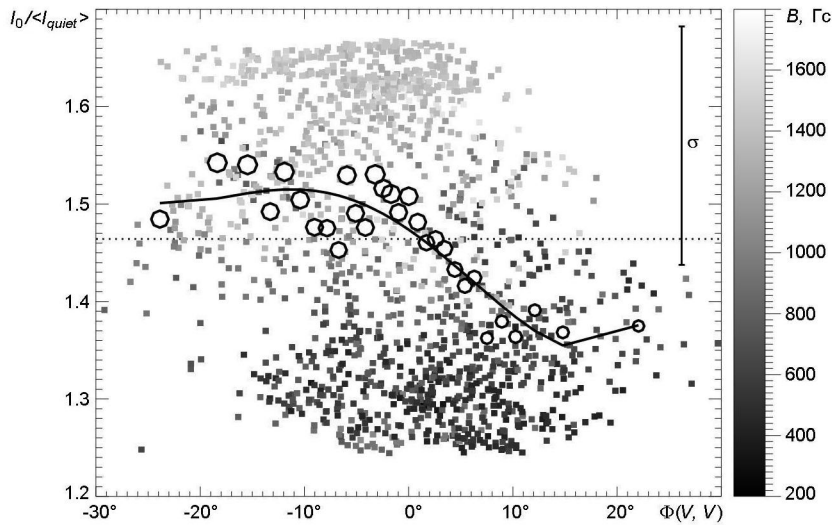


Рис. 4. Двовимірна залежність контрасту I_0/I_{quiet} в центрі лінії Ca II H від зсуву фаз хвилі (V, V) та напруженості фотосферного магнітного поля B . Квадратики — значення I_0/I_{quiet} та (V, V) в кожному пікселі факельної ділянки. Світлі кружки — середні значення контрасту в інтервалах $\Delta\Phi$, у яких міститься однакова кількість пікселів. Розміри кружків пропорційні напруженості магнітного поля. Згладжені значення контрасту апроксимовано поліномом четвертого степеня (суцільна лінія). Інші позначення такі ж, як і на рис. 3

Залежність яскравості факела від потужності коливань швидкості хвилі. Згідно з висновками роботи [19] контраст факела в центрі лінії Ca II H залежить не тільки від знаку та величини зсуву фаз, але ще й від потужності коливань швидкості хвилі. Зокрема, у ділянках, де хвилі поширюються вгору, контраст факела стає тим більшим, чим вища потужність цих хвиль. Водночас у ділянках, де хвилі поширюються вниз, спостерігається протилежний ефект. Мета нашої роботи — більш детально дослідити реакцію факела на потужність

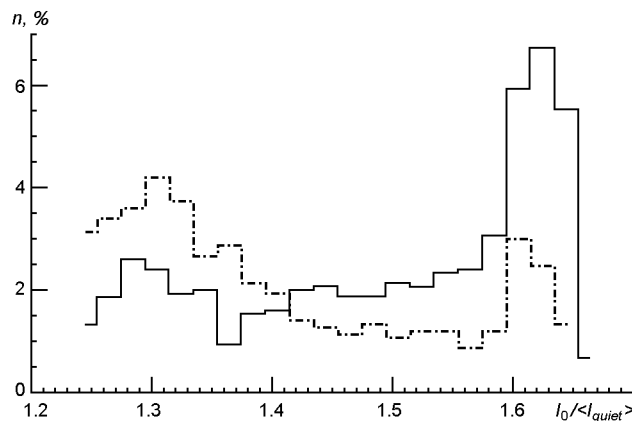


Рис. 5. Гістограми розподілу контрасту в факелі для двох випадків: суцільна лінія — для ділянок, де хвилі поширюються вгору ($\Phi(V, V) < 0$), частка їхньої площі становить 54.8 %, штрих-пунктирна лінія — для ділянок, де хвилі поширюються вниз ($\Phi(V, V) > 0$, частка площі 45.1 %)

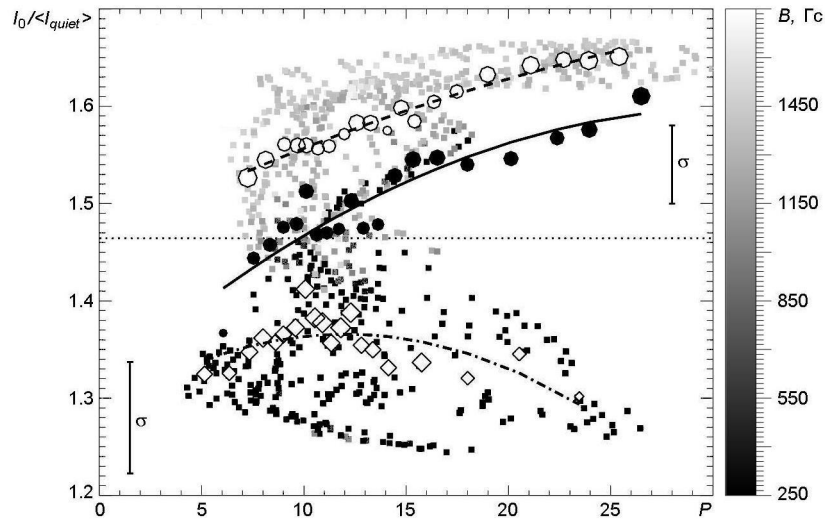


Рис. 6. Двовимірна залежність контрасту I_0/I_{quiet} в центрі лінії Ca II H від потужності P коливань швидкості та напруженості B магнітного поля для хвиль, які поширюються вгору ($(V, V) < 0$). Квадратики — значення I_0/I_{quiet} та потужності коливань в кожному пікселі факельної ділянки. Круги та ромбики — середні значення контрасту в інтервалах потужності з однаковою кількістю пікселів; їхні розміри пропорційні величині напруженості магнітного поля. Штрихова лінія та світлі круги — усереднені значення I_0/I_{quiet} для ділянок факела з контрастом, вищим за середнє значення 1.464; для них характерні середні значення параметрів $I_0/I_{quiet} = 1.591$, $B = 1340$ Гс, $h = 1145$ км, частка площі, яку займають ці ділянки, становить 34.6 %. Штрих-пунктирна лінія та ромбики — усереднені значення I_0/I_{quiet} для ділянок з контрастом, нижчим за середнє 1.464; для них $I_0/I_{quiet} = 1.353$, $B = 768$ Гс, $h = 1825$ км, частка площі 20.2 %. Суцільна лінія та чорні круги — усереднені по всіх пікселях значення контрасту. Інші позначення ті ж, що і на рис. 3

коливань хвилі за допомогою двох діаграм розсіювання контрасту I_0/I_{quiet} , побудованих у вигляді залежності від потужності коливань хвилі та напруженості магнітного поля (рис. 6 та 7). На першому з них представлено результати для хвиль, які поширюються вгору, на другому — для хвиль, які поширюються вниз.

Просторове усереднення у межах всього діапазону контрасту (суцільні лінії), показане на цих рисунках, на перший погляд підтверджує висновок, який був зроблений в роботі [19]. Дійсно, в середньому на ділянках факела, де хвилі рухаються вгору, яскравість факела збільшується зі збільшенням потужності хвилі, а на ділянках, де хвилі рухаються вниз, спостерігається зворотна залежність. Насправді такі висновки слід сприймати з обережністю.

З рис. 6 та 7 видно, що в ділянках, де яскравість перевищує середнє значення, контраст факела збільшується зі зростанням потужності коливань незалежно від того, в якому напрямку поширюється хвиля (див. штрихові лінії та світлі круги). Важлива відмінність тільки в тому, що площа яскравих ділянок, в яких хвилі рухаються вгору, більш ніж удвічі перевищує площу, де хвилі поширюються у зворотному напрямку (відповідно 34.6 % і 14.8 %).

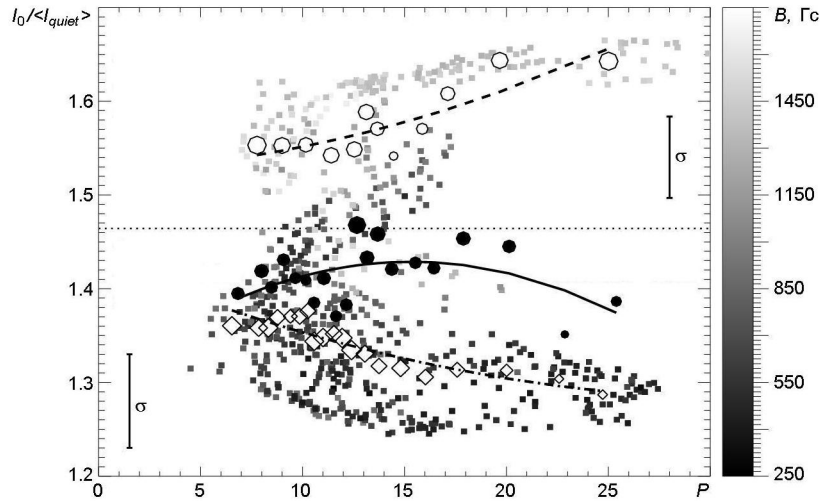


Рис. 7. Те ж саме, що і на рис. 6, але для хвиль, які поширюються вниз ($(V, V) > 0$). Штрихова лінія та кружки — усереднені значення I_0 / I_{quiet} для ділянок факела з контрастом, більшим за середнє значення 1.464. Для них $I_0 / I_{quiet} = 1.578$, $B = 1281$ Гс, $h = 1215$ км, частка площі $No = 14.8\%$. Штрих-пунктирна лінія та ромбики — усереднені значення I_0 / I_{quiet} для ділянок з контрастом, нижчим за середнє значення 1.464; для них $I_0 / I_{quiet} = 1.337$, $B = 656$ Гс, $h = 1957$ км, частка площі $No = 30.3\%$

У ділянках факела, де яскравість нижча за середню, поведінка обох хвиль змінюється на протилежну: зі збільшенням потужності коливань контраст факела починає зменшуватись (див. штрих-пунктирні лінії та світлі ромбики). При цьому співвідношення площ, зайнятих в цих областях хвилями, що поширюються вгору і вниз, змінюється на протилежне (20.2 % і 30.3 % відповідно).

Потужність коливань, як це випливає з рис. 6 та 7, залежить в свою чергу від напруженості магнітного поля: у магнітних елементах факела з підвищеною яскравістю що більша величина B , то більшою є потужність коливань для обох видів хвиль (світлі кружки різного розміру). У ділянках зі зменшеною яскравістю спостерігається зворотна залежність (світлі ромбики різного розміру).

На закінчення нам хотілось би звернути увагу на одну важливу обставину. Зрозуміло, що для отримання відповіді на питання, яку роль в нагріванні факела відіграють хвилі, необхідно, щоб такі величини, як яскравість факела, напруженість магнітного поля та параметри хвилі стосувались однієї і тієї ж висоти h .

У нашій роботі потужність коливань було знайдено на висоті $h = 650$ км, а саме на висоті формування випромінювання в центрі лінії Ва II 455.4 нм. Випромінювання в центрі лінії Са II H в яскравих ділянках факела з сильним магнітним полем ($B \sim 1300$ Гс), як це видно з рис. 3, 6 та 7, виходить з нижніх хромосферних шарів, розташованих досить близько до області формування центра лінії Ва II 455.4 нм.

Таким чином, збільшення контрасту зі збільшенням потужності коливань хвиль, яке ми отримали на рис. 6 і 7 для областей факела з

підвищеною яскравістю, можна розглядати як один з аргументів на користь того, що ці області здаються яскравими не тільки через депресію Вільсона, але і завдяки реальному нагріванню хвилями.

Для ділянок факела із слабшим полем ($B \sim 700$ Гс), та, як наслідок, з яскравістю, нижчою за середню ($I_0 / I_{quiet} < I_0 / I_{quiet}$), вимога, щоб значення напруженості поля, контрасту та потужності коливань хвиль, нанесені на рис. 6 та 7, стосувались однієї і тієї ж висоти h , не виконується. Наші оцінки показують, що в ділянках зі зменшеною яскравістю область формування випромінювання в центрі лінії Ca II H розміщена у верхній хромосфері ($h \sim 1900$ км), тобто набагато вище, ніж ділянки, у яких вимірювалась потужність коливань. Як наслідок, відповідь на питання, чи можуть хвилі бути причиною нагрівання ділянок з яскравістю, нижчою за середню, залишається відкритим, оскільки в нашій роботі немає спостережних даних про потужність коливань хвиль у верхній хромосфері факела.

ВИСНОВКИ

В нашій роботі проведено вимірювання кількох параметрів факельної ділянки, які характеризують її атмосферу на різних висотах: контрасту I_0 / I_{quiet} у хромосфері, напруженості магнітного поля B та кута нахилу його силових ліній в нижній фотосфері, зсуву фаз (V, V) між коливаннями швидкості хвиль в нижній фотосфері та коливаннями швидкості в області температурного мінімуму. З цією метою було використано результати спостережень факельної ділянки поблизу центра сонячного диска, а саме: спектрополяриметричні спостереження параметрів Стокса двох ліній Fe I 1564.3 і 1565.8 нм, фільтрові спостереження в різних ділянках профілю лінії Ba II 455.4 нм та фільтрові спостереження в центрі лінії Ca II H 396.8 нм.

Ми проаналізували причини уповільнення зростання яскравості (контрасту) факела в центрі лінії Ca II H зі збільшенням напруженості магнітного поля та наступного його зменшення в ділянках, де значення B більші за 1400 Гс. Ми пояснили таку поведінку яскравості нелінійною залежністю НЛТР-функції джерела цієї лінії від висоти.

Дослідження залежності контрасту факела від зсуву фаз (V, V) показало, що хвилі, які поширюються вгору, з фотосфери у хромосферу, можуть спостерігатись як у місцях з підвищеною яскравістю ($I_0 / I_{quiet} > I_0 / I_{quiet}$), так і у місцях зі зменшеною яскравістю. Така поведінка характерна і для хвиль, які поширюються у зворотному напрямку. При цьому в ділянках з сильним магнітним полем і з яскравістю, вищою за середнє значення I_{quiet} , переважають хвилі, які рухаються вгору, тоді як у ділянках із слабшим полем і з яскравістю, меншою за це значення, частіше спостерігаються хвилі, напрямлені вниз.

Ми розглянули, як контраст факела корелює з потужністю коливань швидкості хвиль. Виявилось, що в яскравих ділянках, незалежно

від напрямку поширення хвилі, він збільшується зі збільшенням потужності коливань. При цьому ділянки, де хвилі рухаються вгору, займають приблизно 70 % всієї поверхні факела. У ділянках факела, де яскравість нижча за середню, спостерігається зворотна картина: зі збільшенням потужності коливань контраст факела зменшується, а частка областей, зайнятих тут висхідними хвилями, зменшується до 40 %.

Наші результати показують, що потужність коливань швидкості чутлива до величини напруженості магнітного поля: у магнітних елементах факела з підвищеною яскравістю більшим значенням величини B відповідає більша потужність коливань для обох хвиль. У ділянках зі зменшеною яскравістю спостерігається зворотна картина.

Ми вважаємо, що збільшення контрасту зі збільшенням потужності коливань хвиль, яке має місце в яскравих ділянках факела, може свідчити про здатність хвильових рухів реально підвищувати температуру цих ділянок.

1. Abbasvand V., Sobotka M., Heinzel P., et al. (2020) Chromospheric heating by acoustic waves compared to radiative cooling. II. Revised grid of models. *Astrophys. J.* 890. 22—28.
2. Beck C., Khomenko E., Rezaei R., Collados M. (2009) The energy of waves in the photosphere and lower chromosphere. I. Velocity statistics. *Astron. and Astrophys.* 507. 453—467.
3. Berger T. E., Rouppe van der Voort L. H. M., Löfdahl M. G., et al. (2004) Solar magnetic elements at 0.1 arcsec resolution. General appearance and magnetic structure. *Astron. and Astrophys.* 428. 613—628.
4. Cally P. S., Khomenko E. (2015) Fast-to-Alfvén mode conversion mediated by the Hall current. I. Cold plasma model. *Astrophys. J.* 814. 106—116.
5. Carlsson M., Stein R. F., Nordlund Å., Scharmer G. B. (2004) Observational manifestations of solar magnetoconvection: Center-to-limb variation. *Astrophys. J.* 610. L137—L140.
6. Collados M., Lagg A., Díaz García J. J., et al. (2007) Tenerife infrared polarimeter II. The physics of chromospheric plasmas. Eds P. Heinzel, I. Dorotović, R. J. Rutten. ASP Conf. Ser. 368. 611—616.
7. Gingerich O., Noyes R.W., Kalkofen W., Cuny Y. (1971) The Harvard-Smithsonian reference atmosphere. *Solar Phys.* 18. 347—365.
8. Gonzalez-Morales P. A., Khomenko E., Vitas N., Collados M. (2020) Joint action of Hall and ambipolar effects in 3D magneto-convection simulations of the quiet Sun. I. Dissipation and generation of waves. *Astron. and Astrophys.* 642. A220—A237.
9. Hirzberger J., Wiehr E. (2005) Solar limb faculae. *Astron. and Astrophys.* 438. 1059—1065.
10. Keller C. U., Schüssler M., Vögler A., Zakharov V. (2004) On the origin of solar faculae. *Astrophys. J.* 607. L59—L62.
11. Khomenko E. (2009) Simulations of waves in sunspots. Solar-stellar dynamos as revealed by helio- and asteroseismology: GONG 2008/SOHO 21, Eds M. Dikpati, T. Arentoft, I. González Hernández, C. Lindsey, F. Hill. ASP Conf. Ser. 416. 31—40.
12. Khomenko E., Cally P. S. (2012) Numerical simulations of conversion to Alfvén waves in sunspots. *Astrophys. J.* 746. 68—77.

13. Khomenko E., Collados M. (2012) Heating of the magnetized solar chromosphere by partial ionization effects. *Astrophys. J.* 747. 87—97.
14. Khomenko E., Vitas N., Collados M., de Vicente B. (2018) Three-dimensional simulations of solar magneto-convection including effects of partial ionization. *Astron. and Astrophys.* 618 A87—102.
15. Kobel P., Solanki S. K., Borrero J. M. (2011) The continuum intensity as a function of magnetic field. I. Active region and quiet Sun magnetic elements. *Astron. and Astrophys.* 531. A112-A123.
16. Kostik R. I., Khomenko E. (2007) Observations of a bright plume in solar granulations. *Astron. and Astrophys.* 476. 341—347.
17. Kostik R., Khomenko E. (2012) Properties of convective motions in facular regions. *Astron. and Astrophys.* 545. A22—A30.
18. Kostik R., Khomenko E. (2013) Properties of oscillatory motions in a facular region. *Astron. and Astrophys.* 559. A107—A116.
19. Kostik R., Khomenko E. (2016) The possible origin of facular brightness in the solar atmosphere. *Astron. and Astrophys.* 589. A6—A12.
20. Kostyk R. I. (2015) What mechanisms allow 5-minute oscillations in active regions of the solar surface to penetrate from the photosphere into the chromosphere? *Kinematics Phys. Celestial Bodies.* 31(4). 188—192.
21. Kostyk R. I. (2018) Effect of wave motions in the active region of the solar surface on convection. *Kinematics Phys. Celestial Bodies.* 34(2). 82—87.
22. Linsky J. L., Avrett H. E. (1972) The solar H and K lines. *Publ. Astron. Soc. Pacif.* 82. 485. 169—248.
23. Montagne M., Mueller R., Vigneau J. (1996) The photosphere of the Sun: statistical correlations between magnetic field, intensity and velocity. *Astron. and Astrophys.* 311. 304—310.
24. Narayan G., Scharmer G. B. (2010) Small-scale convection signatures associated with a strong plage solar magnetic field. *Astron. and Astrophys.* 524. A3—A18.
25. Okunev O. V., Kneer F. (2004) On the structure of polar faculae on the Sun. *Astron. and Astrophys.* 425. 321—331.
26. Okunev O. V., Kneer F. (2005) Numerical modeling of solar faculae close to the limb. *Astron. and Astrophys.* 439. 323—334.
27. Popescu Braileanu B., Lukin V. S., Khomenko E., de Vicente Á. (2019) Two-fluid simulations of waves in the solar chromosphere II. Propagation and damping of fast magneto-acoustic waves and shocks. *Astron. and Astrophys.* 630. A79—A96.
28. Rajaguru S. P., Sangeetha C. R., Tripathi D. (2019) Magnetic fields and the supply of low-frequency acoustic wave energy to the solar chromosphere. *Astrophys. J.* 871. 155—169.
29. Rezaei R., Bruls J. H. M. J., Schmidt W., Beck C., Kalkofen W., Schlichenmaier R. (2008) Reversal-free CaII H profiles: a challenge for solar chromosphere modeling in quiet inter-network. *Astron. and Astrophys.* 484. 503—509.
30. Ruiz Cobo B., del Toro Iniesta J. C. (1992) Inversion of Stokes profiles. *Astrophys. J.* 398. 375—385.
31. Schroeter E. H., Soltau D., Wiehr E. (1985) The German solar telescopes at the Observatorio del Teide. *Vistas in Astron.* 28. 519—525.
32. Shchukina N. G., Olshevsky V. L., Khomenko E. V. (2009) The solar Ba II 4554 C line as a Doppler diagnostic: NLTE analysis in 3D hydrodynamical model. *Astron. and Astrophys.* 506. 1393—1404.
33. Shelyag S., Khomenko E., de Vicente Á., Przybylski D. (2016) Heating of the partially ionized solar chromosphere by waves in magnetic structures. *Astrophys. J.* 819. L11—L16.

34. Sobotka M., Heinzel P., Svanda M., et al. (2016) Chromospheric heating by acoustic waves compared to radiative cooling. *Astrophys. J.* 826. 49—56.
35. Solanki S. K. (1993) Small scale solar magnetic fields — An overview. *Space Sci. Rev.* 63. 188.
36. Spruit H. C. (1976) Pressure equilibrium and energy balance of small photospheric fluxtubes. *Solar Phys.* 50. 269—295.
37. Srivastava A. K., Ballester J. L., Cally P. S., et al. (2021) Chromospheric heating by MHD waves and instabilities. Manuscript submitted to *J. Geophys. Res. Space Phys.* eprint arXiv:2104.02010.
38. Stangalini M., Del Moro D., Berrilli F., Jeeries S. M. (2011) MHD wave transmission in the Sun's atmosphere. *Astron. and Astrophys.* 534. A65—A71.
39. Stebbins R., Goode P. R. (1987) Waves in the solar photosphere. *Solar Phys.* 110. 237—253.
40. Steiner O. (2005) Radiative properties of magnetic elements. II. Center to limb variation of the appearance of photospheric faculae. *Astron. and Astrophys.* 430. 691—700.
41. Title A. M., Topka K. P., Tarbell T. D., et al. (1992) On the differences between plage and Quiet Sun in the solar photosphere. *Astrophys. J.* 393. 782—794.
42. Topka K. P., Tarbell T. D., Title A. M. (1992) Properties of the smallest solar magnetic elements. I. Facular contrast near Sun center. *Astrophys. J.* 396. 351—363.
43. Topka K. P., Tarbell T. D., Title A. M. (1997) Properties of the smallest solar magnetic elements. II. Observations versus hot wall models of faculae. *Astrophys. J.* 484. 479—486.
44. Tritschler A., Schmidt W., Langhans K., Kentischer T. (2002) High-resolution solar spectroscopy with TESOS — Upgrade from a double to a triple system. *Solar Phys.* 211. 17—29.
45. Vögler A. (2005) On the effect of photospheric magnetic fields on solar surface brightness. Results of radiative MHD simulations. *Mem. Soc. Astron. Ital.* 76. 842—849.
46. Vögler A., Shelyag S., Schussler M., et al. (2005) Simulations of magneto-convection in the solar photosphere. Equations, methods, and results of the MURaM code. *Astron. and Astrophys.* 429. 335—351.
47. Wilson A. (1774) Observations on the solar spots. *Phil. Trans.* 64. 1—30.

N. G. Shchukina^{1,2,3}, *R. I. Kostyk*¹

¹Main Astronomical Observatory of National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

²Astronomical Observatory, Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

³Astronomical Observatory of Ivan Franko National University, Lviv, Ukraine

RESULTS OF OBSERVATIONS OF WAVE MOTIONS IN THE SOLAR FACULA

The results of spectropolarimetric and filter observations of the facular region in the lines Fe I 1564.3, Fe I 1565.8 nm, Ba II 455.4 nm, and Ca II H 396.8 nm obtained near the solar disk center at the German Vacuum Tower Telescope (Tenerife, Spain) are discussed. It is shown that the facular contrast measured at the Ca II H line center first grows more and more slowly with magnetic field strength, and then, with its further increase goes down. The reason for this is the nonlinear height dependence of the line source function caused by

a deviation from local thermodynamic equilibrium. It was found that waves propagating both upward and downward can be observed in any area of the facula, regardless of its brightness. Moreover, in bright areas with the strong magnetic field, upward waves dominate, while in less bright areas with the weaker field, downward waves are more often observed. The facular contrast measured at the center of the Ca II H line is shown to correlate with the power of the wave velocity oscillations. In bright areas, it grows with the power, it does not matter in which direction the waves are propagating. In the areas with low brightness, the opposite dependence is observed for both types of waves. The power of the wave velocity oscillations, in turn, is sensitive to the magnetic field strength. In the facular bright magnetic elements the stronger the field, the higher the power of oscillations for both upward and downward waves. In the case of reduced brightness, the inverse relationship is observed. We conclude that the increase in contrast with the wave velocity power which is observed in the bright facular regions can be considered as evidence that these areas look bright not only because of the Wilson depression, but also because of heating of the solar plasma by waves.

Keywords: solar activity, spectropolarimetric observations, magnetic fields, thermodynamic conditions, solar faculae.

Стаття надійшла до редакції 28.07.2021

Після доопрацювання 09.08.2021

Прийнята до друку 13.10.2021