

УДК 523.985 + 52-337

В. Лоцицький, д-р фіз.-мат. наук  
Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ**СПЕКТРАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ МАГНІТНИХ ПОЛІВ І ТЕРМОДИНАМІЧНИХ УМОВ  
В АКТИВНИХ ОБЛАСТЯХ НА СОНЦІ**

Наведено основні результати досліджень магнітних полів і термодинамічних умов в активних областях на Сонці, отримані в Астрономічній обсерваторії Київського національного університету імені Тараса Шевченка (АО КНУ) упродовж останніх 10 років (2010–2019 рр.). За даними космічної обсерваторії *Ninode* оцінено дійсні діаметри гранично маломасштабних (просторово-нероздільних) силових трубок магнітного поля. Цей діаметр виявився в межах 15–20 км, що значно менше, ніж межа просторового розділення найбільших на сьогодні сонячних телескопів ( $\approx 60$  км). За даними спостережень в АО КНУ показано, що в сонячному факелі існували магнітні поля трьох типів: кілогаусові поля в субтелескопічних силових трубках, ділянки фонового поля регулярної полярності і ділянки субтелескопічних полів змішаної полярності. Магнітний потік змішаної полярності перевищував за абсолютною величиною потік усього поля регулярної полярності не менше ніж у 2 рази. У ядрах сонячних плям, які спостерігались на ГСТ АО КНУ та АЦУ-5 ГАО НАН України, виявлено тонкі ефекти зєсманівського розщеплення, які вказують на надсильні магнітні поля напруженістю у 5–8 кГс. Полярність магнітного поля у субтелескопічних структурах із такими дуже сильними полями виявлена тією ж, що і у фоновому полі, а доплерівська швидкість становить близько 2 км/с (підйом плазми). Надсильні магнітні поля в діапазоні 5–5,7 кГс виявлено також за даними спостережень на телескопі GST обсерваторії Біг Бер (BBSO), США. Проаналізовано унікальний спостережний матеріал, також отриманий в АО КНУ, щодо області сейсмічного джерела винятково потужного сонячного спалаху 28 жовтня 2003 р. бала X17.2 / 4B – третього в рейтингу за величиною рентгенівського потоку за останні приблизно 40 років. У цьому спалаху виявлено бальмерівський декремент із рекордним співвідношенням інтенсивностей  $I(\text{H}\beta) / I(\text{H}\alpha) = 1,68$  ліній H $\beta$  і H $\alpha$ , що є безпрецедентним для всіх спостережених спалахів. У цьому спалаху виявлено вказівки на існування особливо сильних магнітних полів у діапазоні декількох десятків кілогаусів. Напівемпірична модель цього спалаху має цікаву особливість, а саме, три дискретні шари з підвищеною концентрацією плазми і температурою, включаючи дуже густий і тонкий шар у хромосфері з такими параметрами: концентрація водню  $n_{\text{H}} = 10^{18} \text{ см}^{-3}$ , товщина  $\Delta h = 3\text{--}5$  км і висота  $h \approx 1200$  км над рівнем фотосфери. В активних сонячних протуберанцях виявлено досить сильні магнітні поля (до 4 кГс) на висотах 3–14 Мм. Моделювання профілів спектральних ліній у межах двокомпонентної моделі показало, що дійсна величина локальних магнітних полів може бути ще більшою принаймні у 3 рази. Запропонована теоретична МГД модель, згідно з якою такі високі напруженості виникають у безсилових магнітних джгутках із характерним масштабом 300 км.

**Ключові слова:** Сонце, сонячна активність, спектрально-поляризаційні спостереження, магнітні поля, термодинамічні умови, сонячні факели, плями, спалахи, протуберанці, напівемпіричні моделі.

**Вступ.** Сонце – не тільки найближча, але багато в чому унікальна зоря. Вона є зорею стабільного типу, із незначною зміною світності, але зі значними змінами сонячної активності. Сонячна активність є дуже складним явищем в атмосфері Сонця, яке має магнітну природу. Її вивчення має велике значення для фундаментальної науки і прикладних досліджень. Сонце, по суті, є відносно недалекою від нас космічною лабораторією, де реалізуються такі фізичні умови і процеси, яких неможливо досягти в земних лабораторіях і які неможливо вивчити детально на інших, значно більш далеких зорях. Враховуючи те, що сонячні магнітні поля є дуже неоднорідними, маломасштабними, важливо вивчати їх за допомогою сонячних телескопів із максимальними вхідними апертурами, а також методами, які дозволяють отримувати достовірну інформацію про фізичні умови на Сонці у просторово-нероздільних (субтелескопічних) масштабах.

Сонячна активність має різні спостережні прояви на різних висотах в атмосфері Сонця. У найглибшому доступному для прямих спостережень шарі атмосфери Сонця – його фотосфері (яка відповідає висотам від 0 до 500 км над рівнем формування спектрального континууму у видимій області спектра) сонячна активність проявляється у формі сонячних факелів і плям, в яких зосереджені сильні концентровані магнітні поля (із напруженістю магнітного поля від одного до кількох кілогаусів). У хромосфері Сонця (висоти від 500 до 2000 км) активним областям відповідають хромосферні факели (флокули), а також характерна структура тонких хромосферних волоконць, типова для картини силових ліній лабораторних магнітів. На корональному рівні (висоти більше 2000 км) активні області мають вигляд локальних утворень із підвищеною густиною корональної плазми і температурою, а також із характерною петельною або шоломоподібною структурою. Про локальні магнітні поля у хромосфері й особливо короні майже немає прямих даних, що пов'язано, як буде пояснено нижче, в основному, із методичними причинами.

Метою цієї статті є короткий огляд основних результатів досліджень магнітних полів і термодинамічних умов в активних областях на Сонці, отриманих спектральними методами в Астрономічній обсерваторії Київського національного університету імені Тараса Шевченка впродовж останніх 10 років (2010–2019 рр.). Матеріал статті викладено так, що в ній спершу розглядаються прояви активності Сонця на найглибшому рівні (на рівні фотосфери, у сонячних факелах і плямах), потім на більш високому (на хромосферному рівні, у сонячних спалахах) і завершуються розглядом активних утворень у нижній короні (у протуберанцях і лімбових спалахах).

**Сонячні факели.** Сонячні факели є найменш інтенсивним проявом сонячної активності на фотосферному рівні. Вважається, що Сонце є цілком "спокійним", якщо на його диску видно лише грануляцію – конвективні комірки з діаметром близько 1 Мм (1000 км), які мають характерний час існування кілька хвилин (найчастіше 8 хв). При виникненні на Сонці активної області, ще до появи сонячних плям, з'являються саме факели – більш гарячі ділянки фотосфери, які при високому просторовому розділенні розпадаються на яскраві фотосферні гранули. Факели оточують групу плям упродовж усього часу її розвитку – від появи і до поступового розпаду. Коли група сонячних плям повністю розпадається і зникає, на місці її існування знову залишаються лише сонячні факели.

Магнітні поля у сонячних факелах вимірюють за допомогою ефекту Зеемана. Цей ефект є основним інструментом для прямих вимірювань магнітних полів Сонця й інших зірок. При однорідному магнітному полі цей ефект має двоякі спектральні прояви: а) розщеплення спектральної лінії на кілька компонент; б) поляризація цих компонент

розщеплення. За величиною розщеплення компонент можна виміряти напруженість магнітного поля, а по поляризації компонент – його полярність, а також орієнтацію вектора напруженості магнітного поля. Певна поляризація компонент розщеплення може бути вагомим (іноді – вирішальним) аргументом на користь того, що спостережувані зміни у профілях ліній обумовлені саме магнітним полем, а не, наприклад, ефектом Доплера.

Однак в окремих випадках ефект Зеємана може спостерігатись і без наявності поляризації у профілі спектральної магніточутливої лінії. Наприклад, це може бути тоді, коли на вхідну щілину спектрографа проєктуються просторово-нероздільні (субтелескопічні) ділянки, що мають протилежні магнітні полярності, але однакові напруженості й фактори заповнення компонент із протилежною полярністю. Тоді стоковий профіль  $I$  цієї лінії буде дещо розширеним або й розщепленим (залежно від напруженості магнітного поля), тоді як стоковий профілі  $Q$ ,  $U$  та  $V$  будуть близькі до нуля скрізь у сфері довжин хвиль спектральної лінії. Діаметри найтонших магнітних силових трубок у фотосфері близько 15–20 км [4], тому при спостереженнях навіть із найсучаснішими сонячними телескопами типу GREGOR або GST BBSO, які мають дифракційну межу просторового розділення близько 60 км, такі силові трубки просторово не розділяються і їм відповідає за межами сонячних плям дуже малий фактор заповнення  $f$ , тобто для них  $f \ll 1$ .

Нині переважає така точка зору: вказані неоднорідні магнітні поля змішаної полярності можна вимірювати лише на основі спостереження ефекту Ханле. Це дійсно так, але лише для напруженостей не вище 100–200 Гс [33]. При сильніших полях ефект Ханле незастосовний, однак саме в цьому діапазоні напруженостей, як показано в роботі [10], можна використовувати ефект Зеємана для оцінювання величини таких різнополярних магнітних полів.

Виявити магнітні поля протилежних полярностей можна тоді, коли зіставити спостережені півширини стокових профілів  $I$  для ліній із різною магнітною чутливістю. На основі розрахунків теоретичних профілів ліній було показано, що, використовуючи лінії Fe I 5247.1 і 5250.2 з високими факторами Ланде (2.0 і 3.0, відповідно), майже однаковою глибиною формування і температурною чутливістю, можна вимірювати знакозмінні заплутані поля з напруженостями вище 150–200 Гс, якщо точність вимірювання відношення півширин стокових профілів  $I$  цих ліній на рівні 1 %. Якщо ж точність вимірювання цього відношення підвищити до 0,5 %, то таким чином можна вимірювати знакозмінні магнітні поля, починаючи із 70–100 Гс. Це означає, що можна стикувати між собою діапазони реєстрації цих полів на основі ефектів Ханле і Зеємана. З урахуванням використання запропонованого методу встановлено, що у сонячному факелі, який спостерігався 6 серпня 2013 р. у хвостовій частині активної області NOAA 1809, напруженість знакозмінних магнітних полів була  $\pm 650$  Гс, якщо вважати магнітне поле чисто поздовжнім. На основі аналізу цих даних, а також результатів інших досліджень можна зробити висновок про те, що в дослідженому факелі ймовірно існували магнітні поля трьох типів: кілогауссові поля  $B_{fluxtube}$  в субтелескопічних силових трубках, ділянки фонового поля  $B_{backgr}$  регулярної полярності [27] і ділянки субтелескопічних полів  $B_{mixpol}$  змішаної полярності. Магнітний потік заплутаних знакозмінних полів за абсолютною величиною перевищував потік усього регулярного поля з напруженостями  $B_{fluxtube}$  та  $B_{backgr}$  не менше ніж у 2 рази [10].

Переважно вважається, що за межами сонячних плям  $B_{fluxtube} = 1\text{--}2$  кГс [31, 33]. Така оцінка отримана по лініях із високою магнітною чутливістю і не виключає існування більш сильних магнітних полів. Для оцінки локальних магнітних полів у ширшому діапазоні була використана лінія Fe I 5233, яка чутлива до спектральних ефектів від магнітних полів у діапазоні до  $\leq 15$  кГс. Були досліджені бісектори профілів  $I \pm V$  лінії Fe I 5233 у сонячному факелі, який спостерігався 07.08.2013 р. на ешелюному спектрографі ГСТ АО КНУ. Отримані дані свідчили про несприятливий для цієї лінії наближення слабкого однокомпонентного магнітного поля. На це вказує дуже значна (до 5 раз) відмінність розщеплення бісекторів у різних частинах профілю лінії. Тонший ефект виявлено при аналізі середньоквадратичного відхилення спостереженого розщеплення бісекторів від лінійного тренду. На віддалі від центра лінії близько 120 мÅ це відхилення є максимальним порівняно з шумовими ефектами і вказує на ймовірне існування локальних магнітних полів із напруженістю близько 7.4 кГс [12]. Спостережені свідчення щодо таких екстремально сильних магнітних полів, що зосереджені у просторово-нероздільних структурах і мають дуже малий фактор заповнення, виявлено також у спектрах сонячних плям.

Діагностику просторово-нероздільних магнітних полів на Сонці можна здійснювати іншим шляхом, а саме, моделюванням сонячної магнітоконвекції за допомогою сучасних програмних кодів, розрахунком профілів ліній для відповідної моделі сонячної атмосфери і вивченням діагностичних залежностей, які дають зв'язок між параметрами магнітного поля і параметрами зеєманівського розщеплення спектральних ліній. Для цього в роботі [6] використано код MURAM для моделювання 3D-MHD магнітоконвекції. Для відповідної моделі атмосфери використано програмний код NICOLE для розрахунку профілів Стокса спектральних ліній Fe I 6301,5 і 6302,5 Å. На основі аналізу цих ліній розглянуто три різні методи визначення фактора заповнення сильних магнітних полів і з'ясовано, що найбільш однозначні висновки можна отримати, якщо аналізувати ширину піків параметра Стокса  $V$  лінії Fe I 6301,5.

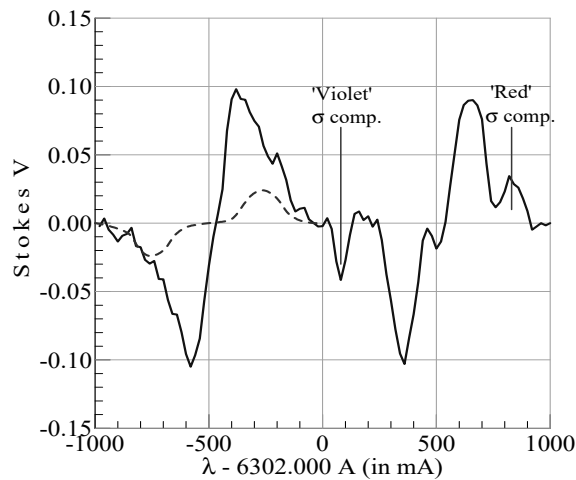
**Сонячні плями** – добре видимі прояви сонячної активності з повільною еволюцією і тривалим часом існування. Їх діаметр у межах від кількох до  $\approx 150$  Мм, що набагато більше, ніж межа просторового розділення сучасних сонячних телескопів (0,06–0,1 Мм). Саме тому вони є досить зручними об'єктами для спостережень і вимірювань у них магнітного поля. З'ясовано, що сонячні плями можуть мати різну магнітну полярність і напруженість магнітного поля у межах, як правило, 2000–3000 Гс, і дуже рідко 4000–6000 Гс [9].

У розвинених плямах із тінню і півтінню напруженість магнітного поля в середньому, зростає з розміром плями. Саме в тінях сонячних плям можна прямим чином виміряти важливу характеристику магнітного поля – модуль вектора напруженості. Така можливість може бути реалізована завдяки тому, що при магнітних полях у 2–3 кГс зеєманівське розщеплення  $\Delta\lambda_n$  є повним для деяких вузьких ліній нейтрального заліза Fe I з півшириною близько 0,1 Å і великими факторами Ланде ( $g = 2,5\text{--}3$ ), тобто при цьому повністю спектрально розділяються зеєманівські  $\pi$ - і  $\sigma$ -компоненти. Регулярні вимірювання напруженостей у тині сонячних плям ведуться візуальним методом за незмінною методикою вже близько 100 років. Нині такі вимірювання регулярно проводять лише в таких обсерваторіях світу, як Маунт Вілсон, Кітт Пік, КрАО, АО КНУ й обсерваторії Уральського університету. Цінність таких даних полягає в їх досить довгому ряді вимірювань, надійності й досить високій точності. Для порівняння можна сказати, що, наприклад, регулярні магнітографічні вимірювання магнітних полів Сонця ведуться на орбітальній обсерваторії SOHO ли-

ше з 1995 р., причому такі вимірювання дають наближено лише поздовжню компоненту вектора напруженості, а не його абсолютну величину. Крім того, магнітографічні вимірювання не дозволяють точно визначити величину магнітного поля в ядрі сонячної плями. Щодо візуальних вимірювань, то при накопиченні великих масивів однорідних даних й узагальненні даних із різних обсерваторій можна виміряти відповідні магнітні індекси сонячних плям ( $H_m$  та  $B_{sp}$ ) із точністю близько 10 Гс або  $10^{-3}$  у відносних одиницях. Така точність, формально, можлива і при магнітографічних даних, але при цьому втрачається фізичний смисл відповідної спостережної характеристики. Адже тоді визначається деякий параметр, залежний від величини магнітного поля, нахилу його силових ліній до променя зору, фактора заповнення тощо. Водночас, при зведенні в єдиний ряд вимірювань у різних обсерваторіях виникають певні методичні проблеми, які детально розглянуто в роботі [9].

Сонячні плями, подібно до інших проявів активності на Сонці, мають дуже тонку структуру магнітних полів і швидкостей. Найбільш виразно цю структуру можна бачити у північній сонячній плямі. Найменші елементи цієї структури, імовірно, просторово не розділяються і саме в них можуть існувати особливо сильні магнітні поля. Їх можна виявити, детально аналізуючи тонкі фотометричні ефекти в зеєманівському розщепленні спектральних ліній.

Із цією метою досліджено кілька великих сонячних плям, які спостерігались у 2002, 2003 і 2014 рр. на горизонтальному сонячному телескопі Астрономічної обсерваторії Київського університету [13, 18]. У спектрах цих плям виявлено такі особливості: а) непаральність бісекторів профілів  $I \pm V$  лінії Fe I 6301,5 Å із максимумом їх розщеплення на віддалі близько  $\pm 250$  мÅ від центра лінії; б) слабкі вторинні максимуми у профілі Стокса V, розташовані на середній віддалі  $\pm 375$  мÅ від центра лінії Fe I 6302,5 Å (рис. 1).



**Рис. 1.** Спостережені профілі Стокса V спектральних ліній Fe I 6301,5 і 6302,5 Å у сонячній плямі 29.10.2003 р., усереднені на ділянці 5 Мм на Сонці. Вертикальні лінії вказують положення вторинних піків параметра V для лінії Fe I 6302,5 Å. Якщо ці вторинні піки ототожнити з "фіолетовою" і "червоною" зеєманівськими  $\sigma$ -компонентами, то відповідна напруженість магнітного поля становить 8 кГс [13]

Тісна кореляція ( $r = 0,77 \pm 0,06$ ) між ефектами (а) і (б) вказує на те, що це спостережні прояви одного і того ж явища – присутності в тіні сонячних плям субтелескопічних магнітних структур із напруженістю магнітного поля близько 8 кГс [13, 18]. Перш ніж дійти до такого висновку, було детально проаналізовано вплив таких немагнітних факторів, як молекулярні бленди, інструментальна поляризація, аномальна дисперсія. Полярність магнітного поля у структурах із такими дуже сильними полями виявлена тією самою, що і у фоновому полі напруженістю 3–3,5 кГс, а доплерівська швидкість становить близько 2 км/с (підйом плазми). Фактор заповнення  $f$  для відповідних структур досягає значень  $f = 0,2–0,3$ , причому їх реєстровні прояви вдалося прослідкувати протягом 12 Мм у тіні сонячної плями. Вказано на ймовірний механізм утримання таких структур – скручування силових ліній у магнітних полях безсилового типу. Надсильні магнітні поля в діапазоні 5–5,7 кГс виявлені також за даними спостережень на телескопі GST обсерваторії Біг Бер (BBSO), США [28].

Наведені вище результати щодо величини і структури магнітного поля у сонячних плямах залишають відкритим питання: якою є верхня межа напруженостей магнітного поля у сонячних плямах? Для з'ясування цієї проблеми необхідні нові спостережні дані на інших сонячних телескопах, з іншими інструментальними особливостями і в інших спектральних лініях. У зв'язку із цим були проведені та проаналізовані спостережні дані на горизонтальному сонячному телескопі АЦУ-5 ГАО НАН України. Спостереження проводились у червні–серпні 2015 р. Магнітні поля вимірювалися по зеєманівському розщепленню кількох ліній Fe I, Mn I та Ni I, розташованих у спектрі поблизу ліній Fe I 5434,5 Å та Fe I 6093,66 Å. Ефективні фактори Ланде  $g_{eff}$  цих ліній у межах від  $-0,22$  до  $2,14$ . Виявлено суттєві відмінності вимірюваних напруженостей як для ліній із різними, так і з близькими величинами  $g_{eff}$ . Лінія Fe I 5434,5 Å ( $g_{eff} = -0,014$ ) у деяких місцях сонячних плям виявляє достовірне розщеплення, що відповідає магнітним полям напруженістю 2,5–8 кГс. У всіх досліджених випадках лінія Fe I 6094,419 Å із негативним фактором Ланде ( $g_{eff} = -0,22$ ) розщеплюється у спектрах плям подібно до ліній із позитивним фактором Ланде ( $g_{eff} > 0$ ) [29].

Таким чином, спостереження на АЦУ-5 ГАО підтвердили висновок, отриманий спершу при роботі зі спектральним матеріалом із ГСТ АО КНУ: особливо сильні магнітні поля з напруженістю до 8 кГс дійсно ймовірні у сонячних плямах. Більше того, ці спостереження загострили питання і щодо можливого існування у плямах ще сильніших магнітних полів діапазону  $\sim 10^4$  Гс, які раніше були виявлені у сонячних спалахах [14–17, 19]. Із порівняння стокових профілів  $I$  шести ліній із різними факторами Ланде виявлено, що лінія Fe I 5434,5 Å має додаткове розширення на

20–25 %, яке може відображати наявність у тіні й півтіні плями "заплутаних" магнітних полів із різною полярністю і дуже високою напруженістю. Таким чином, більш чи менш сильні "заплутані" різнополярні магнітні поля ймовірно існують не лише у спокійних областях [33], але також і в сонячних факелах [10]. Їх існування, еволюція і фізичні властивості представляють значний інтерес для сучасної МГД теорії сонячного магнетизму.

**Сонячні спалахи** – спорадичні вибухоподібні процеси в атмосфері Сонця, джерелом енергії яких є магнітні поля. У процесі спалаху магнітна енергія трансформується в інші види енергій – електромагнітного випромінювання, теплових і турбулентних рухів плазми, прискорених частинок, ударних хвиль і корональних викидів [30]. Можна очікувати, що спалах має супроводжуватися зменшенням напруженості магнітного поля і магнітної енергії в області його виникнення. Однак при спостереженнях цей ефект здебільшого або не виявляється, або ж існує лише в одній магнітній полярності, тоді як в іншій полярності він може бути навіть протилежний за знаком. Можливою причиною того, що очікуваний дефіцит магнітної енергії під час спалаху не виявляється, є невраховування чисто немагнітних (викликаних термодинамічними ефектами) змін профілів тих магніточутливих ліній, по яких вимірюється магнітне поле. У деяких випадках це може дати навіть фіктивну вимірну магнітну полярність. Крім того, часто аналізується лише поздовжня компонента поля, і до того ж – у наближенні однокомпонентної моделі. Водночас, на сьогодні вже не викликає сумніву, що магнітні поля в активних і спокійних областях є суттєво структурованими: вони включають як мінімум одну маломасштабну компоненту (яка при сучасному рівні просторового розділення завжди виступає як субтелескопічна, із характерним розміром елементів  $\leq 60$  км), і ще одну більш великомасштабну, фонову. У такому разі, вимірювання в наближенні однокомпонентної моделі дають скоріше магнітний потік, а не напруженість магнітного поля. Для визначення локальних магнітних полів, що відповідають елементам субтелескопічної структури, слід використовувати спеціальні методи; такі методи для випадку спалахів запропоновані в роботах [5, 14–17, 20, 26].

На основі використання обчислювальної програми PANDORA, яка враховує відхилення від ЛТР, побудовано напівемпіричні моделі висотного розподілу фізичних параметрів із висотою у кількох потужних сонячних спалахах [2–3, 8, 22]. Напівемпіричні моделі дозволили встановити, що магнітне поле в області сонячних спалахів є дуже неоднорідним не лише у горизонтальному напрямку, але й по висоті.

Щоб краще узгодити теорію і спостереження, доводилося вводити дві компоненти, що мали напруженості  $B_1$  і  $B_2$ . При цьому обидві компоненти мали максимум в області верхньої фотосфери й температурного мінімуму ( $\lg \tau_5 = -4 \dots -3,5$ ), тоді як у нижній фотосфері ( $\lg \tau_5 = -1,0 \dots 0,0$ ) магнітні поля були значно слабшими або ж навіть близькими до нуля. Це є нетривіальним випадком для сонячної атмосфери: оскільки газовий тиск різко падає з висотою у спокійних областях і саме він, в основному, має підтримувати в рівновазі відповідні силові трубки, там можна очікувати монотонного зменшення величини магнітного поля з висотою. Оскільки у сонячних спалахах маємо зовсім інший випадок – його локальне підсилення у певному діапазоні висот, – то це вказує на дію специфічного механізму підсилення магнітного поля з висотою, можливо, у формі МГД вихору або ж екранованого безсилового поля [25, 32]. Такі структури, теоретично, мають тісний контакт сильних магнітних полів протилежної полярності, які за певних умов можуть давати множинні пересполучення силових ліній із потужним енерговиділенням у формі сонячного спалаху.

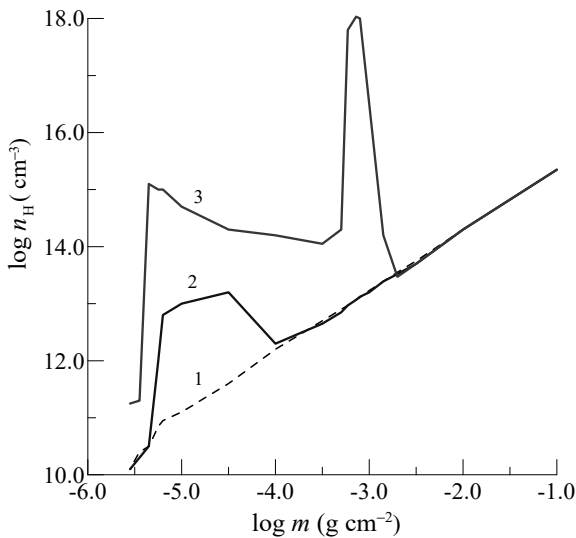
Зазначимо, що немонотонний розподіл магнітного поля з висотою спостерігався не у всіх спалахах [1–3]. Можливо, це залежить від фази спалаху. На користь цього свідчать дані, отримані в роботі [8]. Із них випливає, що в максимумі спалаху існував гострий висотний пік магнітного поля у верхній фотосфері, де напруженість досягала  $200 \text{ мТл} = 2 \text{ кГс}$ . Уже через 4 хв цей пік суттєво зменшився за висотою (до  $1 \text{ кГс}$ ) і змістився у глибші шари фотосфери. А через 10 хв висотний розподіл магнітного поля вже не мав жодних локальних піків і якісно був майже таким, як у незбуреній атмосфері. Показово, що турбулентні швидкості  $v_t$  при цьому поступово підсилювались у процесі спалаху. Це є прямим свідченням перетворення магнітної енергії на енергію механічних рухів плазми в області спалаху.

Ще суттєвіші локальні неоднорідності у висотному розподілі фізичних параметрів були виявлені у винятково потужному сонячному спалаху 28 жовтня 2003 р. бала X17.2 / 4В – третьому в рейтингу за рентгенівським потоком за останні приблизно 40 років [22]. Для вивчення фізичних умов у цьому спалаху були вивчені 12 спектральних ліній, у тому числі лінії FeI, FeII а також H $\alpha$ , H $\beta$ , H $\gamma$ , H $\delta$ , які спостерігались за допомогою ешелюного спектрографа горизонтального сонячного телескопа Астрономічної обсерваторії Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Виявилось, що цей сонячний спалах мав бальмерівський декремент із рекордним співвідношенням  $I(\text{H}\beta) / I(\text{H}\alpha) = 1,68$  інтенсивностей ліній H $\beta$  і H $\alpha$ , що є безпрецедентним для всіх спостережених спалахів. Це свідчить про велику оптичну товщу спалаху, унаслідок якої він є непрозорим для випромінювання у перших лініях серії Бальмера. Наявність у цьому спалаху областей із високою густиною підтверджується і напівемпіричною моделлю спалаху (рис. 2). Така модель спалаху, побудована з використанням коду PANDORA, має цікаву особливість, а саме, три дискретні шари з підвищеною концентрацією і / або температурою, включаючи дуже густий і тонкий шар у хромосфері з такими параметрами: концентрація водню  $n_H = 10^{18} \text{ см}^{-3}$ , товщина  $\Delta h = 3\text{--}5 \text{ км}$  і висота  $h \approx 1200 \text{ км}$  над фотосферою [22]. Аналогічна шарувата структура спалахів у напівемпіричних моделях була виявлена раніше іншими дослідниками, але не з такими екстремальними проявами.

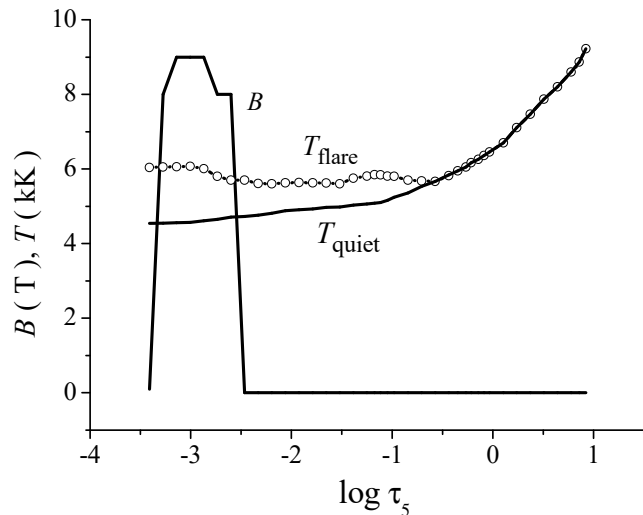
У цьому спалаху за межами сонячних плям ефективно магнітне  $B_{\text{eff}}$  знайдено рівним 0–200 Гс у середній фотосфері,  $\leq 1200 \text{ Гс}$  – у верхній фотосфері і в зоні температурного мінімуму та  $\leq 500 \text{ Гс}$  – у хромосфері. Також виявлено суттєве розширення лінії FeI 5250,2 порівняно з лінією FeI 5247,1, що свідчить про наявність сильного (800–1100 Гс) "турбулентного" поля  $B_{\text{turb}}$  у середній фотосфері.

Прямі вимірювання зєсманівського розщеплення по профілях  $I \pm V$  ліній із факторами Ланде  $g_{\text{eff}}$  в інтервалі 1,0–1,7 показали, що в області інтенсивної емісії в лініях металів (а це діапазон висот від верхньої фотосфери до нижньої хромосфери) напруженість магнітного поля доходить до 3–4 кГс [20]. Однак, якби дійсні напруженості магнітного поля у спалахах не перевищували 3–4 кГс, то емісійні піки у лініях типу FeI 5434,5 із винятково низькою магнітною чутливістю ( $g_{\text{eff}} = -0,014$ ) спостерігались би нерозщепленими при тому рівні "шуму" (1–2 %), який є типовим при фотографічних спостереженнях. Насправді ж, у цій лінії іноді бачимо чітке розщеплення емісійних піків. Такі ефекти спостерігались у п'яти потужних сонячних спалахах. Величина розщеплення емісії в ядрі FeI 5434,5 зафіксована в межах 10–35 мА, що відповідає гігантським магнітним полям у 25–90 кГс [15–17, 19]. Згідно з напівемпіричною моделлю фотосферних шарів спалаху (рис. 3) такі магнітні поля зосереджуються у дуже тонкому шарі атмосфери, близько 40–50 км.

Основною проблемою тут є те, що такі дуже сильні магнітні поля мають дуже великий магнітний тиск, який на багато порядків перевищує суму зовнішніх тисків для відповідної силової трубки (газового, динамічного і магнітного). Унаслідок цього відповідні структури повинні існувати дуже короткий час або взагалі не виникати. Наприклад, магнітне поле напруженістю 60 кГс має магнітний тиск  $\sim 10^8$  дин·см<sup>-2</sup>. Але у верхній фотосфері газовий тиск близько  $10^4$  дин·см<sup>-2</sup>, а в короні і хромосфері  $\sim 10^{-1} \dots 10^2$  дин·см<sup>-2</sup>. Тобто, різниця тисків досягає 4–9 порядків. Скомпенсувати таку дуже значну різницю тисків може хіба що якась екзотична топологія силових ліній, наприклад, їх сильна скрученість у безсилових структурах. Була запропонована лінійна безсилова модель [32], яка дозволяє пояснити появу в атмосфері Сонця магнітних полів рівня  $10^4$  Гс.



**Рис. 2.** Зіставлення концентрації атомів водню  $n_H$  залежно від маси плазми  $m$  у стовпчику із площею перерізу  $1 \text{ см}^2$  для різних об'єктів: 1 – незбурена атмосфера, 2 – перша компонента водневої емісії сонячного спалаху 28.102003 р. бала X17.2/4В, 3 – друга компонента емісії цього спалаху [22]



**Рис. 3.** Розподіл магнітного поля  $B$  і температури  $T$  залежно від оптичної товщі  $\tau_5$  у спалаху 28.102003 р. бала X17.2/4В. Для зручності зіставлення даних, магнітне поле представлено у теслах (Т), а температура – у кілокаельвінах (кК). Через  $T_{\text{flare}}$  і  $T_{\text{quiet}}$  позначено температури у спалаху і спокійній атмосфері [21]

Ця модель має цікаві особливості, зокрема, дискретність напруженостей на осі безсилових структур і знакозмінну периферію, в якій тісно контактують магнітні поля протилежних полярностей. Щодо спостережень, то вони дійсно вказують на ймовірну дискретність напруженостей, причому як у сонячних спалахах, так і за їх межами [17, 18].

За спостережним проявом знакозмінної периферії – можуть бути заплутані магнітні поля змішаної полярності, які виявляються скрізь: у спокійних областях, факелах, сонячних плямах і спалахах. При недостатньому просторовому розділенні, ділянки зі знакозмінною полярністю на периферії екранованих безсилових структур дають у спектрі ті ж прояви, що й мультиполярне заплутане магнітне поле.

Ще однією специфічною особливістю просторово-нероздільних структур із дуже сильними і дискретними за величиною магнітними полями є суттєве зниження в них кінетичної температури. На це вказують дуже вузькі особливості у спектрі (емісійні піки або ж максимуми розщеплення бісекторів), які згідно зі спостереженнями мають ширину до 30–40 мА, а після врахування інструментального розширення – лише 10...20 мА [24]. Це відповідає кінетичній температурі нижче 1000 К. Таким чином, надсильні магнітні поля, імовірно, викликають різке охолодження плазми в місцях їх виникнення. Теоретично це питання ще недостатньо вивчене.

**Протуберанці й лімбові спалахи.** Результати вимірювань магнітних полів у протуберанцях, отримані різними авторами й різними методами, суттєво відрізняються між собою. Як правило, дані вимірювань за допомогою аналізу ефекту Ханле [34] відповідають слабшим полям (типово декілька десятків гаусів), ніж на основі ефекту Зеемана (у деяких випадках –  $10^2 \dots 10^3$  Гс). Очевидно, тут грає роль також тип протуберанця. В активних протуберанцях, часто пов'язаних із сонячними спалахами, імовірно існування сильніших полів, ніж у спокійних. Зокрема, у роботі [23] для трьох активних протуберанців були виміряні по лінії H $\alpha$  і D3HeI магнітні поля від –600 до +1500 Гс. При цьому відзначено цікавий ефект – тенденція до антикореляції напруженостей по H $\alpha$  і D3HeI. Наведені вище значення напруженостей виявлено на висотах 3–14 Мм.

Ще одне джерело можливих розбіжностей вимірювань у різних протуберанцях – особливості методики вимірювань. Наприклад, при вимірюваннях методом зміщення "центра ваги" кожного із профілів  $I + V$  та  $I - V$  знаходять усереднене магнітне поле, яке у випадку двокомпонентної структури (фон + субтелескопічні силові трубки) відображає величину магнітного поля, проміжну між напруженістю у "фоні" і силових трубках. Утім, це справедливо лише при однаковій полярності магнітного поля в цих місцях протуберанця: якщо магнітні полярності в обох компонентах поля різні, то це може дати, залежно від співвідношення факторів заповнення силових трубок і фону, дуже широкий діапазон вимірюваних напруженостей, а також обидва варіанти вимірюваних магнітних полярностей. Можливе звуження профілів ліній у силових трубках також суттєво змінює величину вимірюваного магнітного поля.

Щоб наблизитись до оцінок локального (амплітудного) магнітного поля, у роботі [23] запропоновано вимірювати не зміщення "центрів ваги" кожного із профілів  $I + V$  та  $I - V$ , а розщеплення їх бісекторів у тому їх місці, де вони, середньостатистично, розщеплюються найбільше – на рівні інтенсивності 0,9 від максимальної. Відповідну характеристику було позначено через  $B_{0,9}$ . У роботі [11] показано, що якщо припустити двокомпонентну структуру магнітного

поля (фон зі слабким полем + компонента із сильним полем, але малим фактором заповнення і вузькими профілями ліній), а також гауссові профілі ліній в обох компонентах поля, то вдається пояснити форму бісекторів типу латинської літери "V". При цьому дійсна величина локального магнітного поля у сильній субтелескопічній компоненті виявляється у 4–5 разів більшою, ніж безпосередньо виміряний параметр  $B_{0,9}$ .

У протуберанцях і лімбових спалахах була виявлена (у поодиноких випадках) петлеподібна форма бісекторів. Щоб пояснити такі особливості профілів, виконано їх моделювання у припущенні двокомпонентного магнітного поля, що складається зі слабкої фонові компоненти і сильної маломасштабної, яка просторово не розділяється. Профілі ліній у фоновій компоненті вважались завжди гауссовими, тоді як у маломасштабній вони припускались не гауссовими – деформованими як великою оптичною товщею, так і мікро- і макротурбулентними швидкостями. Магнітне поле припускалося скрізь чисто поздовжнім.

Виявилось, що значна оптична товща ( $\tau_{0,\sigma} \gg 1$ ), а також суттєво звужені профілі ліній в компоненті із сильним магнітним полем дозволяють природним чином пояснити спостережені дані. При цьому дійсне розщеплення зєсманівських  $\sigma$ -компонент компоненти із сильним полем і параметр розщеплення бісекторів  $B_{0,9}$  помітно відрізняються – дійсне розщеплення  $\sigma^+$  і  $\sigma^-$  компонент виявляється у 3–6 разів більшим, ніж розщеплення бісекторів на рівні інтенсивності 0,9. Це досить значна величина, яка вказує на те, що дійсні магнітні поля у протуберанцях можуть бути набагато сильнішими (принаймні у 3–6 разів), ніж отримуються із прямих спостережень по параметру  $B_{0,9}$ .

Таким чином, прямі оцінки локальних магнітних полів у протуберанцях по параметру  $B_{0,9}$  дають лише нижню межу дійсного локального поля. Якщо структура магнітного поля, у першому наближенні, є двокомпонентною (фон + субтелескопічні емісійні елементи), то дійсне локальне магнітне поле в емісійних елементах у 3–6 разів сильніше, ніж згідно з величиною параметра  $B_{0,9}$ . Причому це справедливо як при малій оптичній товщі, так і при великій ( $\tau_{0,\sigma} \gg 1$ ). Із результатів моделювання випливає, що в субтелескопічних елементах протуберанців може бути не тільки досить сильне магнітне поле (в окремих випадках воно досягає 4–5 кГс), але й істотно звужені (у 5–6 разів) профілі спектральних ліній. Ці особливості аналогічними тим, які знайдені раніше у сонячних спалахах [17, 19].

Спектрально-поляризаційні спостереження лімбових сонячних спалахів, проведені на ГСТ АО КНУ, показали, що досить сильні магнітні поля можуть виникати у внутрішній сонячній короні навіть на висотах у десятки тисяч кілометрів. Так, у лімбовому сонячному спалаху 19.07.2012 р. бала М 7.7 були виявлені магнітні поля напруженістю  $\approx 800$  Гс на висоті 40 Мм [7]. Була запропонована теоретична модель, яка пояснює появу таких сильних полів на великих висотах сильною скрученістю силових ліній магнітного поля, при якому величина магнітного поля може зрости на два порядки.

**Висновки.** Коротко підсумуємо основні результати спектральних досліджень магнітних полів і термодинамічних умов в активних областях на Сонці, отримані в АО КНУ за останнє десятиліття (2010–2019 рр.). З аналізу даних космічної обсерваторії Hinode випливає, що дійсний діаметр гранично маломасштабних силових трубок магнітного поля становить близько 15–20 км, що значно менше, ніж межа просторового розділення найбільших на сьогодні сонячних телескопів ( $\approx 60$  км). За даними спостережень в АО КНУ показано, що у сонячному факелі ймовірно існують магнітні поля трьох типів: кілогауссові поля в субтелескопічних силових трубках, ділянки фонового поля регулярної полярності і ділянки субтелескопічних полів змішаної полярності. Магнітний потік змішаної полярності перевищує за абсолютною величиною потік усього поля регулярної полярності не менше ніж у 2 рази. У ядрах сонячних плям, які спостерігались на ГСТ АО КНУ та АЦУ-5 ГАО НАН України, виявлено тонкі ефекти зєсманівського розщеплення, які вказують на надсильні магнітні поля напруженістю у 5–8 кГс. Полярність магнітного поля у субтелескопічних структурах із такими дуже сильними полями виявлена тією ж, що і у фоновому полі з напруженістю  $\approx 3$  кГс, а доплерівська швидкість – близько 2 км/с (підйом плазми). Надсильні магнітні поля в діапазоні 5–5,7 кГс виявлено також за даними спостережень на телескопі GST обсерваторії Біг Бер (BBSO), США. Було проаналізовано унікальний спостережний матеріал, отриманий в АО КНУ, який стосується області сейсмічного джерела винятково потужного сонячного спалаху 28 жовтня 2003 р. бала X17.2 / 4B – третього в рейтингу за величиною рентгенівського потоку за останні приблизно 40 років. У цьому спалаху виявлено бальмерівський декремент із рекордним співвідношенням  $I(H\beta) / I(H\alpha) = 1,68$  інтенсивностей ліній  $H\beta$  і  $H\alpha$ , що є безпрецедентним для всіх спостережених спалахів. У цьому спалаху виявлено вказівки на існування особливо сильних магнітних полів у діапазоні декількох десятків кілогаусів. Напівемпірична модель цього спалаху має цікаву особливість, а саме три дискретні шари з підвищеною концентрацією плазми і температурою, включаючи дуже густий і тонкий шар у хромосфері з такими параметрами: концентрація водню  $n_H = 10^{18}$  см<sup>-3</sup>, товщина  $\Delta h = 3$ –5 км і висота  $h \approx 1200$  км над рівнем фотосфери. В активних сонячних протуберанцях виявлено досить сильні магнітні поля (до 4 кГс) на висотах 3–14 Мм. Моделювання профілів спектральних ліній у рамках двокомпонентної моделі показало, що дійсна величина локальних магнітних полів може бути ще більшою принаймні у 3 рази. Запропонована теоретична МГД модель, згідно з якою такі високі напруженості виникають у безсилових магнітних джгутях із характерним масштабом 300 км. У цілому ж, у цьому напрямі геліофізики остається ще багато неясних питань, які вимагають ґрунтовних досліджень у майбутньому.

#### Список використаних джерел

1. *Abramenko V.I.* Flare-related changes in the profiles of six photospheric spectral lines / V.I. Abramenko, E.A. Baranovsky // *Solar Physics*. – 2004. – Vol. 220, Iss. 1. – P. 81–91.
2. The photosphere model of the solar flare on 18 July 2000 of 2N/M2 class (in Russian: Модель фотосфери солнечной вспышки балла 2N/M2 18 июля 2000 года / E.S. Andriets, N.N. Kondrashova, E.V. Kurochka, V.G. Lozitsky // *Bull. of Crimea Astrophys. Obs.* – 2012. – Vol. 108, № 1. – P. 7–12.
3. *Baranovsky E.A.* Modelling of photosphere and chromosphere of two powerful flares (28 October 2003 and 1 September 1990) (in Russian: Моделирование фотосферы и хромосферы двух мощных вспышек (28 октября 2003 г. и 1 сентября 1990 г.)) / E.A. Baranovsky, V.G. Lozitsky, V.P. Tarashchuk // *Kinematics and Physics of Celestial Bodies*. – 2009. – Vol. 25, No. 5. – P. 373–384.
4. *Botygina O.O.* Estimation of the fluxtube diameters outside sunspots using Hinode observations. Preliminary results / O.O. Botygina, M.Yu. Gordovskyy, V.G. Lozitsky // *Advances in Astronomy and Space Physics*. – 2016. – № 6. – С. 20–23.
5. *Gordovskyy M.* Observations of unresolved photospheric magnetic fields in solar flares using FeI and CrI lines / M.Yu. Gordovskyy, V.G. Lozitsky // *Solar Physics*. – 2014. – Vol. 289, Iss. 10. – P. 3681–3701.
6. Analysis of unresolved photospheric magnetic field structure using FeI 6301 and 6302 lines / M. Gordovskyy, S. Shelyag, P.K. Browning, V.G. Lozitsky // *Astronomy and Astrophysics*. – 2018. – Vol. 619, id. A164. – 10 p.
7. Magnetic Fields in a Limb Flare on July 19, 2012 / E.A. Kirichek, A.A. Solov'ev, N.I. Lozitskaya, V.G. Lozitsky // *Geomagnetism and Aeronomy*. – 2013. – Vol. 53, No. 7. – P. 831–834.

8. Kurochka E.N. Temporary changes of physical conditions in photospheric layers of solar flare / E.N. Kurochka, V.G. Lozitsky, O.B. Osyka // Kinematics and Physics of Celestial Bodies. – 2008. Vol. 24, No. 4. – P.308–320.
9. Methodical problems of magnetic field measurements in umbra of sunspots / N.I. Lozitska, V.G. Lozitsky, O.A. Andryeyeva et al. // Advances in Space Research. – 2015. – Vol. 55, Iss. 3. – P. 897–907.
10. Lozitsky V. Measurements of spatially unresolved magnetic fields of mixed polarity using observations of the Zeeman effect in the solar faculae (in Ukrainian: Вимірювання просторово-нероздільних магнітних полів змішаної полярності за спостереженнями ефекту Зеемана у сонячному факелі) / V. Lozitsky // Bull. of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Astronomy. – 2018. – Vol. 58. – P. 23–28.
11. Lozitsky V. Estimations of local magnetic fields in prominences which have large optical thickness in emissive elements (in Ukrainian: Оцінки локальних магнітних полів у протуберанцях, що мають велику оптичну товщу в емісійних елементах) / V. Lozitsky, V. Masliukh, O. Botygina // Bull. of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Astronomy. – 2015. – Vol. 52. – P. 7–11.
12. Lozitsky V. Local magnetic field diagnostics in solar faculae using FeI 5233 line (in Ukrainian: Діагностика локальних магнітних полів у сонячному факелі по лінії FeI 5233) / V. Lozitsky, O. Osyka, V. Lyakh // Bull. of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Astronomy. – 2015. – Vol. 52. – P. 11–15.
13. Lozitsky V.G. Indications of 8-kilogauss magnetic field existence in the sunspot umbra / V.G. Lozitsky // Advances in Space Research. – 2016. – Vol. 57. – P. 398–407.
14. Lozitsky V.G. Magnetic fields and FeI line profiles in the major solar flare on October 28, 2003 / V.G. Lozitsky // Astronomy Letters. – 2009. – Vol. 35, No. 2. – P.136–142.
15. Lozitsky V.G. Observational evidences to the  $10^5$  G magnetic fields in active regions on the Sun / V.G. Lozitsky // Journal of Physical Studies. – 2009. – Vol. 13, No. 2. – P. 2903-1-2903-8.
16. Lozitsky V.G. Observations of magnetic fields with strength of several tesla in solar flares (in Russian: Наблюдения магнитных полей напряженностью в несколько тесла в солнечных вспышках) / V.G. Lozitsky // Kinematics and Physics of Celestial Bodies. – 1998. – Vol. 14, № 5. – P. 401–414.
17. Lozitsky V.G. Small-scale magnetic field diagnostics in solar flares using bisectors of  $I \pm V$  profiles / V.G. Lozitsky // Advances in Space Research. – 2015. – Vol. 55, Iss. 3. – P. 958–967.
18. Lozitsky V.G. Spectral manifestations of extremely strong magnetic fields in the sunspot umbra / V.G. Lozitsky // Advances in Space Research. – 2017. – Vol. 59. – P. 1416–1424.
19. Lozitsky V.G. Strong magnetic fields in small-scale structures and flares on the Sun (in Russian: Сильные магнитные поля в мелкомасштабных структурах и вспышках на Солнце) // V.G. Lozitsky / DrSci Dissertation: 01.03.03 – Kyiv, 2003. – 299 p.
20. Observations of magnetic field evolution in a solar flare / V.G. Lozitsky, E.A. Baranovsky, N.I. Lozitska, U.M. Leiko // Solar Physics. – 2000. – Vol. 191, No. 1. – P. 171–183.
21. Mixed-polarity magnetic fields in the area of seismic source associated with a large proton solar flare / V.G. Lozitsky, E.A. Baranovsky, N.I. Lozitska, V.P. Tarashchuk // Journal of physical studies. – 2019. – Vol. 23, № 4. – 4903, 7 p.
22. Profiles of spectral lines, magnetic fields and thermodynamical conditions in X17.2/4B solar flare of October 28, 2003 / V.G. Lozitsky, E.A. Baranovsky, N.I. Lozitska, V.P. Tarashchuk // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. – 2018. – Vol. 477, Iss. 2. – P. 2796–2803.
23. Lozitsky V.G. Comparison of the magnetic fields in active prominences measured from HeI D<sub>3</sub> and H $\alpha$  lines / V.G. Lozitsky, O.A. Botygina // Astronomy Letters. – 2012. – Vol. 38, No. 6. – P. 380–387.
24. Anomalous decreasing of the turbulent velocities in space magnetoplasma with strong and small-scale magnetic fields / V.G. Lozitsky, M.Yu. Gordovsky, N.I. Lozitska, E. Golbraikh // Кинематика и физика небесных тел. Приложение. – 2000, № 3. – С. 449–450.
25. Lozitsky V.G. Phenomenon of the superstrong magnetic fields in the space plasma: observations and theory / V.G. Lozitsky, A.A. Soloviev // Кинематика и физика небесных тел. Приложение. – 2000, № 3. – С. 445–446.
26. Lozitsky V.G. Observational evidences for multi-component magnetic field structure in solar flares / V.G. Lozitsky, J. Staude // Astrophys. Astron. – 2008. – Vol. 29. – P. 387–404.
27. Lozitsky V.G. An empirical model of the small-scale magnetic element of the solar quiet region / V.G. Lozitsky, T.T. Tsap // Kinematika i Fizika Nebesnykh Tel. – 1989. – Vol. 5, No. 1. – P. 50–58.
28. Problem of super-strong magnetic fields on the Sun: brief chronology and new observational data / V.G. Lozitsky, V.B. Yurchyshyn, K. Ahn et al. // Odessa Astronomical Publications. – 2018. – Vol. 30. – P. 152–155.
29. Osipov S.N. Simultaneous magnetic field measurements in sunspots using spectral lines with different Lande factors / S.N. Osipov, V.G. Lozitsky // Odessa Astronomical Publications. – 2015. – Vol. 28, No. 2. – P. 234–235.
30. Priest E.R. The magnetic nature of solar flares / E.R. Priest, T.G. Forbes // The Astronomy and Astrophysics Review. – 2002. – Vol. 10, Iss. 4. – P. 313–377.
31. Rachkovsky D.N. Small-scale magnetic field diagnostics outside sunspots: comparison of different methods / D.N. Rachkovsky, T.T. Tsap, V.G. Lozitsky // J. Astrophys. Astron. – 2005. – Vol. 26. – P. 435–445.
32. Soloviev A. A. Force-free model of fine-structure magnetic elements / A.A. Soloviev, V.G. Lozitsky // Kinematika i Fizika Nebesnykh Tel. – 1986. – Vol. 2. – P. 80–84.
33. Stenflo J.O. Collapsed, uncollapsed, and hidden magnetic flux on the quiet Sun / J.O. Stenflo // Astronomy and Astrophysics. – 2011. – Vol. 529, id. A42, 20 p.
34. Trujillo Bueno J. A substantial amount of hidden magnetic energy in the quiet Sun / Bueno J. Trujillo, N. Shchukina, Ramos A. Asensio // Nature. – 2004. – Vol. 404, Iss. 6997. – P. 326–329.

Надійшла до редколегії 16.01.20

В. Лозицкий, д-р физ.-мат. наук

Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко, Киев

## СПЕКТРАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ И ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ В АКТИВНЫХ ОБЛАСТЯХ НА СОЛНЦЕ

Приведены основные результаты исследований магнитных полей и термодинамических условий в активных областях на Солнце, полученные в Астрономической обсерватории Киевского национального университета имени Тараса Шевченко (АО КНУ) в течение последних 10 лет (2010–2019 гг.). По данным космической обсерватории Hinode оценены реальные диаметры предельно маломасштабных (пространственно-неразрешимых) силовых трубок магнитного поля. Этот диаметр оказался в пределах 15–20 км, что значительно меньше, чем предел пространственного разрешения крупнейших на сегодня солнечных телескопов ( $\approx 60$  км). По данным наблюдений в АО КНУ показано, что в солнечном факеле существовали магнитные поля трех типов: килогауссовые поля в субтелескопических силовых трубках, участки фонового поля регулярной полярности и участки субтелескопических полей смешанной полярности. Магнитный поток смешанной полярности превышал по абсолютной величине поток всего поля регулярной полярности не менее чем в 2 раза. В ядрах солнечных пятен, которые наблюдались на ГСТ АО КНУ и АЦУ-5 ГАО НАН Украины, обнаружены тонкие эффекты зеемановского расщепления, которые указывают на сверхсильные магнитные поля напряженностью в 5–8 кГс. Полярность магнитного поля в субтелескопических структурах с такими очень сильными полями обнаружена такая же, что и в фоновом поле, а доплеровская скорость около 2 км/с (подъем плазмы). Сверхсильные магнитные поля в диапазоне 5–5,7 кГс обнаружены также по данным наблюдений на телескопе GST обсерватории Биг Бэр (BBSO), США. Проанализирован уникальный наблюдательный материал, также полученный в АО КНУ, касающийся области сейсмического источника исключительно мощной солнечной вспышки 28 октября 2003 г. балла X17.2/4B – третьей в рейтинге по величине рентгеновского потока за последние приблизительно 40 лет. В этой вспышке обнаружено бальмеровский декремент с рекордным соотношением интенсивностей  $I(\text{H}\beta) / I(\text{H}\alpha) = 1,68$  линий  $\text{H}\beta$  и  $\text{H}\alpha$ , что является беспрецедентным для всех наблюдений вспышек. В этой вспышке обнаружены указания на существование особенно сильных магнитных полей в диапазоне нескольких десятков килогауссов. Полуэмпирическая модель этой вспышки имеет интересную особенность, а именно, три дискретных слоя с повышенной концентрацией плазмы и температурой, включая очень густой и тонкий слой в хромосфере со следующими параметрами: концентрация водорода  $n\text{H} = 10^{18} \text{ см}^{-3}$ , толщина  $\Delta h = 3\text{--}5$  км и высота  $h \approx 1200$  км над уровнем фотосферы. В активных солнечных протуберанцах обнаружены достаточно сильные магнитные поля (до 4 кГс) на высотах 3–14 Мм. Моделирование профилей спектральных линий в рамках двухкомпонентной модели показало, что истинная величина локальных магнитных полей может быть еще большей по крайней мере в 3 раза. Предложена теоретическая МГД модель, согласно которой такие высокие напряженности возникают в бессиловых магнитных жгутках с характерным масштабом 300 км.

Ключевые слова: Солнце, солнечная активность, спектрально-поляризационные наблюдения, магнитные поля, термодинамические условия, солнечные факелы, пятна, вспышки, протуберанцы, полуэмпирические модели.

V. Lozitsky, Dr Hab.  
Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv

## SPECTRAL INVESTIGATIONS OF MAGNETIC FIELDS AND THERMODYNAMIC CONDITIONS IN ACTIVE REGIONS ON THE SUN

The main results of studies of magnetic fields and thermodynamic conditions in active regions in the Sun obtained at the Astronomical Observatory of the Taras Shevchenko National University of Kyiv (AO KNU) during the last 10 years (2010–2019) are presented. The true diameter of the extremely small (spatially unresolved) magnetic flux tubes was estimated on a base of data from Hinode Space Observatory; this diameter was found to be within the range of 15–20 km, which is much smaller than the spatial resolution limit of the largest solar telescopes to date ( $\approx 60$  km). According to the observations made at AO KNU, it was shown that there are three types of magnetic fields in a solar faculae: strong (kilogauss range) fields in small-scale flux tubes, areas of weak and moderate background fields of regular polarity, and areas of sub-telescopic fields of mixed polarity. The magnetic flux of mixed polarity exceeds the absolute flux of the entire field of regular polarity by at least 2 times. In the sunspot umbra observed at GST of AO KNU and ATsU-5 of GAO NASU, thin spectral effects of Zeeman splitting were found, which indicate presence of very strong magnetic fields at least of 5,8 kG. The polarity of the magnetic field in sub-telescopic structures with such very strong fields is found to be the same as in the background field, and the Doppler velocity is about 2 km/s (plasma lifting). Super-strong magnetic fields in the range of 5–5,7 kG were also detected from observations of the Big Bear Observatory (BBSO), USA. A unique observational material also obtained on AO KNU concerning the area of a seismic source of extremely powerful solar flare on October 28, 2003 of X17.2 / 4B class was analyzed. This solar flare had a Balmer decrement with a record intensity ratio  $I(\text{H}\beta) / I(\text{H}\alpha) = 1,68$  of the  $\text{H}\beta$  and  $\text{H}\alpha$  lines, which is unprecedented for all flares observed. In this flare, indications of the existence of particularly strong magnetic fields in the range of several tens of kilogauss were found. The semi-empirical model of this flare has an interesting feature, namely three discrete layers with high plasma concentration and temperature, including a very thick and thin layer in the chromosphere with the following parameters: hydrogen concentration  $n_{\text{H}} = 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ , thickness  $\Delta h = 3\text{--}5 \text{ km}$  and height  $h \approx 1200 \text{ km}$  above the level of the photosphere. In active solar prominences, rather strong magnetic fields (up to 4 kG) were detected at altitudes of 3–14 Mm. The modeling of spectral line profiles within the two-component model showed that the true magnitude of local magnetic fields can be even greater by at least 3 times. A theoretical MHD model is proposed, according to which such high strengths occur in force-free magnetic ropes with a characteristic scale of 300 km.

Key words: Sun, solar activity, spectral-polarization observations, magnetic fields, thermodynamic conditions, solar faculae, spots, flares, prominences, semi-empirical models.

УДК 523.98

В. Криводубський, д-р фіз.-мат. наук  
Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ

## ДОСЛІДЖЕННЯ ЦИКЛІЧНОСТІ МАГНЕТИЗМУ СОНЦЯ В МЕЖАХ ТЕОРІЇ МАКРОСКОПІЧНОЇ МАГНІТОГІДРОДИНАМІКИ

Із середини 70-х рр. минулого століття в Астрономічній обсерваторії Київського національного університету імені Тараса Шевченка започатковано новий напрям теоретичних досліджень еволюції глобального магнетизму Сонця в межах макроскопічної МГД. У роботі наведено підсумки вивчення процесів генерації і перебудови великомасштабного (глобального) магнітного поля на основі моделі  $\alpha\Omega$ -динамо з урахуванням нових турбулентних ефектів, відкритих у теорії макроскопічної МГД, і даних геліосейсмологічних експериментів про внутрішнє обертання Сонця.

Установлено, що різкий радіальний градієнт турбулентної швидкості в нижній половині сонячної конвективної зони (СКЗ) приводить до зміни знаку азимутальної компоненти параметра спіральності  $\alpha$ , у результаті чого поблизу дна СКЗ відбувається формування відносно тонкого шару негативного  $\alpha$ -ефекту. Знайдено, що шар негативного  $\alpha$ -ефекту разом зі знаком радіального градієнта кутової швидкості, виявленим у геліосейсмологічних експериментах, дозволяє пояснити напрямок міграції динамо-хвиль на сонячній поверхні. Розраховано магнітне насичення  $\alpha$ -ефекту (альфа-квенчінг) у глибоких шарах СКЗ. Запропоновано пояснення затяжної тривалості 23-го сонячного циклу, яка становила близько 13 років. Для цього використано спостережені дані про суттєве зростання річного модуля магнітних полів сонячних плям у 23-му циклі. Розрахована північно-південна асиметрія структури глобального магнітного поля надає можливість пояснити феномен уявного магнітного "монополя", який спостерігається під час переполюсовок полярного магнетизму. Знайдено, що величини турбулентної електропровідності й турбулентної магнітної проникності сонячної плазми суттєво менші відповідних газокінетичних параметрів. Тому турбулентна дисипація сонячних магнітних полів підсилюється на 4–9 порядків порівняно із класичною омичною дисипацією. Досліджено макроскопічний турбулентний діаманетизм сонячної плазми. Знайдено, що в нижній частині СКЗ турбулентний діаманетизм діє проти магнітної плавучості, виконуючи таким чином роль "негативної магнітної плавучості". У результаті балансу ефектів магнітної плавучості й турбулентного діаманетизму у глибинах СКЗ формується шар заблокованого магнітного поля величиною  $\approx 3000$  Гс. Досліджено турбулентну адвекцію магнітного поля в неоднорідній за густиною плазмі СКЗ. Знайдено, що в нижній половині СКЗ приєкваторіального домену турбулентна адвекція спрямована догори. У результаті сумісної дії магнітної плавучості й турбулентної адвекції глибинні сильні торіодальні поля виносяться на поверхню Сонця в широтній "королівській зоні" сонячних плям. Відзначено роль горизонтального турбулентного діаманетизму в забезпеченні тривалої стабільності сонячних плям. Для пояснення спостереженого явища подвійних максимумів циклу сонячних плям розроблено сценарій, що містить генерацію магнітного поля в тахокліні біля дна СКЗ і наступне винесення цього поля із глибинних шарів на поверхню в широтній "королівській зоні". Відзначено роль радіального  $\omega$ -ефекту у променистій зоні в поясненні спостереженої асиметрії амплітуди двох сусідніх 11-річних циклів сонячних плям.

Ключові слова: турбулентність, макроскопічна магнітогідродинаміка, Сонце, глобальне магнітне поле, геліосейсмологія,  $\alpha\Omega$ -динамо, конвективна зона, магнітна плавучість, овершут, тахоклін, промениста зона, сонячні плями, 11-річний магнітний цикл.

**Вступ.** Однією з фундаментальних проблем сучасної геліогеофізики є питання про походження й варіації магнітної активності Сонця та її земні прояви. Із точки зору довгострокового прогнозування всього комплексу геліогеофізичних явищ особливої актуальності набуває потреба вивчення й обґрунтування циклічності глобального магнетизму Сонця. З огляду на це, виникає необхідність пошуку механізмів, які приводять до збудження магнетизму в сонячних надрах. Глобальне внутрішнє магнітне поле залучається дослідниками для пояснення низки спостережених фактів (дефіциту потоку сонячних нейтрино, тонка структура акустичних коливань Сонця, недостача вмісту літію в сонячній атмосфері та ін.). У статті викладено результати вивчення автором ефектів генерації й перебудови глобального маг-