

УДК 523.98

DOI: <https://doi.org/10.17721/BTSNUA.2023.68.63-70>

Всеволод ЛОЗИЦЬКИЙ, д-р фіз.-мат. наук

ORCID ID: 0000-0002-6895-5271

e-mail: vsevolod.lozitsky@knu.ua

Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

МОЖЛИВОСТІ АСТРОНОМІЧНИХ І ЕКОЛОГІЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ІЗ ГОРИЗОНТАЛЬНИМ СОНЯЧНИМ ТЕЛЕСКОПОМ АСТРОНОМІЧНОЇ ОБСЕРВАТОРІЇ КНУ – ОБ'ЄКТОМ НАЦІОНАЛЬНОГО НАДБАННЯ

Вступ. Поява в останні роки великих сонячних телескопів, на яких досягається просторова роздільна здатність до 50 км на Сонці, загострює питання доцільності використання значно менших сонячних телескопів. У пропонуваній роботі аргументовано тезу про те, що навіть середні й відносно невеликі сонячні телескопи можуть давати важливу інформацію, яка відповідає сучасному рівню науки в галузях астрономії і екологічних досліджень. Це пов'язано з тим, що для спектрально-поляризаційних досліджень активних процесів на Сонці є критично важливим не лише пряме просторове розділення, але також спектральне розділення і широта одночасної реєстрації спектра. Причому високе спектральне розділення може певною мірою компенсувати недостатньо високе просторове розділення. Метою представленої роботи є висвітлення конкретних методичних підходів і результатів у зазначених наукових напрямах на прикладі горизонтального сонячного телескопа Астрономічної обсерваторії Київського національного університету імені Тараса Шевченка (нижче – ГСТ АО КНУ), який нещодавно отримав статус об'єкта національного надбання.

Методи. Використано в основному спектрально-поляризаційний метод, який застосовувався для аналізу спостережених даних у багатьох спектральних лініях, що формуються в діапазоні висот "фотосфера – нижня корона". Локальні характеристики магнітних полів на Сонці визначали як прямим методом (для сонячних плям), так і аналізом тонких ефектів у далеких крилах і сусідньому спектральному континуумі ліній Н-альфа і D3 гелію (для сонячних спалахів). В останньому випадку локальні характеристики магнітного поля і поля швидкостей оцінювали також за допомогою моделювання.

Результати. За даними спостережень на ГСТ АО КНУ виявлено достовірну циркулярну поляризацію протилежного знака в далеких крилах ліній Н-альфа і D3 HeI у двох потужних сонячних спалахах бала X, яка, найімовірніше, вказує на магнітні поля порядку 10^5 Гс. Для обґрунтування цієї інтерпретації досліджено теоретичні особливості ефекту Пашена – Бака в магнітних полях до 100 кГс. Виявлено, що при таких полях спектральна ширина компонентів розщеплення лінії D3 відносно невелика, 0,3 Å, тоді як ширина спостережуваних піків іноді значно більша, що може вказувати на значну дисперсію напруженостей у спалахах. На основі модельних розрахунків показано, що в деяких випадках можливе альтернативне пояснення даних спостережень, яке містить значно слабші магнітні поля (5,5–7,1 кГс), але значні макроскопічні швидкості різних знаків, на рівні $50\text{--}60$ км·с⁻¹.

Висновки. Доведено, що спектрально-поляризаційні спостереження активних процесів на Сонці за допомогою ГСТ АО КНУ мають найбільшу цінність тоді, коли їх проводять в режимі моніторингу з метою зафіксувати екстремально потужні прояви сонячної активності. Показано, що магнітні поля діапазону 10^5 Гс можливі у сонячних спалахах навіть у нижній сонячній короні на висотах до 10–20 Мм, що представляє значний інтерес для МГД теорії концентрованих полів у сонячній атмосфері.

Ключові слова: сонячна активність, сонячні спалахи, спектрально-поляризаційний аналіз, локальні магнітні поля, проблема екстремально сильних магнітних полів.

Вступ

Можливість отримання нової актуальної наукової інформації із спостережень на сонячних телескопах залежить в основному від таких характеристик цих інструментів: (а) просторової, спектральної і часової роздільної здатності; (б) діапазону довжин хвиль, в якому може бути отримана ця інформація; (в) відношення сигнал/шум; (г) реєстрації повного вектора Стокса $\{I, Q, U, V\}$; (д) можливості спостережень у режимі довгих неперервних або квазінеперервних серій (тобто моніторингу). У спектрально-поляризаційних спостереженнях Сонця на діючих нині інструментах, найкращими характеристиками з пункту (а) є такі: ≈ 50 км, $\sim 5 \times 10^5$ і ~ 1 с, відповідно, а по пункту (б) $\sim 10^3$ Å (Rimmele et al., 2020). Відношення сигнал/шум рівня порядку 10^{-5} і просторової роздільної здатності приблизно 20 км заплановано досягти на 4,2-метровому Європейському телескопі (Quintero Noda et al., 2022). Усі найбільші на сьогодні телескопи дозволяють здійснювати реєстрацію повного вектора Стокса (Puschmann et al., 2013; Goode & Cao, 2012; Chang Hui Rao, 2020). Щодо неперервності спостережень, то це може бути реалізовано повною мірою лише на орбітальних телескопах, установлених, наприклад, на обсерваторіях SOHO, Hinode і SDO (див., напр., Scherrer et al., 1995).

Хоча найбільші нині сонячні телескопи вражають своїми інструментальними можливостями, вся сукупність зазначених вище характеристик (а)...(д) не досягається одночасно на жодному телескопі. Зокрема, практично всі найновіші телескопи мають як спектральний монохроматор фільтри Фабрі – Перо, а не спектрографи на основі дифракційної ґратки. Ці фільтри дуже компактні порівняно зі спектрографами на основі дифракційної ґратки, але мають недолік – у них дуже вузька область дисперсії (типово кілька ангстрем) – у тисячі разів вузька, ніж у спектрографах на основі вказаної ґратки. Цей недолік, як покажемо нижче, відіграє суттєву роль у деяких задачах геліофізики.

Метою нашої статті є висвітлення методичних підходів і результатів використання ГСТ АО КНУ для розв'язання актуальних наукових проблем у геліофізиці і в екологічних дослідженнях.

Огляд літератури. Щоб мати уявлення про актуальні проблеми сучасної геліофізики, наведемо цитату зі статті (Quintero Noda et al., 2022, с. 3), яка стосується основних наукових завдань найбільшого нині Європейського Сонячного Телескопа (EST) із діаметром головного дзеркала 4,2 м: "Основною метою проекту є вивчення магнітної зв'язності сонячної атмосфери, з глибин фотосфери до верхньої хромосфери, з високою просторовою і часовою роздільною здатністю і високою магнітною чутливістю. Незважаючи на тонкість цих двох шарів (кілька метрів разом узятих), та фізика, яка керує цими шарами, за своєю суттю дуже відрізняється. Тому структура і динаміка фотосфери і хромосфери також значно відрізняються. Головним параметром, що визначає поведінку плазми, є відношення між газовим і магнітним тиском. Цей параметр відомий як параметр β . У фотосфері та надрах Сонця β більше

© Лоцицький Всеволод, 2023

єдиниці і магнітна енергія концентрується там під дією конвективних рухів. Магнітні поля, які піднімаються завдяки плавучості з глибини конвективної зони, а також внутрішні поля також взаємодіють з плазмою і здатні змінювати ці конвективні рухи й утворювати сонячні плями та активні області. Десь між фотосферою та хромосферою плазма та магнітні сили змінюють баланс і ведуть до сценарію, де β менше одиниці, що призводить до повноти магнітних структур і явищ, які можна спостерігати у хромосфері. Незважаючи на зовні різні просторові розподіли й часові еволюції фотосфери та хромосфери, ці два шари пов'язані безперервною силовою лінією магнітного поля і викликають різні прояви тих самих явищ. *EST* головним чином зосереджений на визначенні цієї зв'язності за допомогою магнітного поля на різних фотосферних і хромосферних висотах і на встановлення його зв'язку з тепловою та динамічною поведінкою плазми. Найвищого рівня наукові питання, які стимулюють *EST*, можна підсумувати так: як магнітне поле виходить на поверхню і розвивається; як енергія транспортується з фотосфери у хромосферу; як енергія вивільняється та накопичується у верхній частині атмосфери; чому Сонце має гарячу хромосферу; як хвилі поширюються з фотосфери у хромосферу; які особливості динаміки великомасштабних магнітних структур. Прикладами і важливими потенційними цілями для *EST* є такі явища, як магнетизм "спокійного" Сонця та його вплив на баланс енергії хромосфери, магніто-акустичні й альфвенівські хвилі, спікули, завихрення і торнадо, нагрівання хромосфери, події локалізованого перез'єднання, спалахи, вибухи ниток, нестабільності протуберанцевої корони, ефекти неідеальної магнітогідродинаміки (МГД) тощо".

Як видно з наведеної цитати, до топпроблем не віднесено проблему екстремально сильних магнітних полів на різних рівнях сонячної атмосфери. Нині вважають, що найсильніші магнітні поля можна спостерігати у сонячних плямах, де їхня напруженість зазвичай становить 2000–3000 Гс, і дуже зрідка 4000–6000 Гс (Livingston et al., 2006; Wang et al., 2018). Такі магнітні поля спостерігають, якщо фактор заповнення f , близький до одиниці. Однак отримано також дані про те, що у просторово нероздільних структурах сонячних плям, для яких $f \ll 1$, можуть існувати й сильніші магнітні поля на рівні 7–8 кГс (Van Noort et al., 2013; Lozitsky, 2016). Магнітне поле напруженістю 8,2 кГс було зареєстроване на ділянці близько 0,3 с дуги в області світлого моста плями (Durán et al., 2020). Такі сильніші магнітні поля можна пояснити (за порядком величини) простим випадком нескрученої силової трубки, в якій магнітний тиск $B^2/8\pi$ урівноважується газовим тиском $p = nkT$ зовні трубки (позначення тут загальноприйняті).

Однак у хромосфері й особливо у сонячній короні величина тиску суттєво зменшена порівняно з фотосферою і дозволяє утримувати у нескрученій силової трубки магнітні поля напруженістю лише кілька десятків гаусів у хромосфері і лише одиниці гаусів – у сонячній короні. Можна було б очікувати, що магнітні поля саме цього діапазону і будуть спостерігатись. Однак це не так: у вказаному діапазоні висот були виміряні магнітні поля від значень порядку 10^2 Гс (Kleint, 2017; Kuridze et al., 2019; Kuckein et al., 2020) до значень 10^3 Гс (Libbrecht et al., 2019; Anfinogentov et al., 2019). Спостережені свідчення ще сильніших магнітних полів напруженістю порядку 10^5 Гс знайдено у лімбових спалахах на спостережуваному матеріалі, отриманому на ГСТ АО КНУ (Yakovkin, & Lozitsky, 2022; 2023).

Імовірно існування таких екстремально сильних магнітних полів не пояснюється сучасною їхньою теорією. Тобто не розроблено детальні МГД моделі, які давали б спостережувані значення магнітного поля з урахуванням того, що його магнітний тиск на кілька порядків перевищує тиск зовнішньої плазми. Можливо, єдиним вірогідним висновком із теорії є те, що такі надсильні магнітні поля повинні бути зосереджені у дуже малих масштабах. Це випливає з "перетворень подібності" (Alfvén, & Fälthammar, 1963). Розвиваючи цей підхід, Stenflo (Stenflo, 2000) зазначає, що сонячна плазма (від ядра, сонячної корони і спалахів) на діаграмі "температура–густина" займає приблизно те саме розташування, що і лазерна плазма, плазма в токамаках і вибухова плазма. Однак сонячна і лабораторна плазми мають ту фундаментальну відмінність, що вони займають суттєво різні об'єми. Зведення одного масштабу до іншого не можна виконати довільно, без зміни інших фізичних параметрів. Припустимо, що лінійний масштаб змінився на фактор γ . З рівнянь Максвелла випливає, що часовий масштаб має тоді змінитись також на фактор γ , електричне поле E і магнітне поле B – на фактор γ^{-1} , густина електричного струму – на γ^{-2} і т. д. Тобто можна очікувати, що у скільки разів зменшиться розмір структури, у стільки ж разів там може бути сильніше магнітне поле. Перевірити справедливості цього підходу можна на якомусь конкретному прикладі. Стенфло 2000 р. відмічає, що якщо взяти наприклад сонячний магнітний цикл, для якого $l \approx 10^9$ км, $B \approx 10$ Гс, $t \approx 22$ роки, і порівняти його з лабораторним масштабом $l \approx 1$ м, то маємо фактор $\gamma \approx 10^{-9}$. Тоді відповідні лабораторні значення $B_{lab} \approx 10^{10}$ Гс, $t_{lab} \approx 1$ с. Але де у природі існують магнітні поля у 10^{10} Гс? Такі й навіть значно сильніші – на нейтронних зорях. Проте там гігантський магнітний тиск $B^2/8\pi$ може бути зрівноважений відповідним газовим тиском. Цього немає у сонячних спалахах, де магнітний тиск на 3–5 порядків перевищує газовий тиск. Тобто тут умова рівноваги відповідної магнітної структури не виконується і тому вона взагалі не повинна існувати. Можливо, тут відіграють певну роль деякі специфічні топологічні особливості силових ліній у таких структурах на Сонці, наприклад, сильна скрученість або згин силових ліній. Це питання нині залишається незрозумілим і являє собою своєрідну "гарячу" проблему у геліофізиці.

Методи

Інструмент і методи

Основні характеристики і використання ГСТ АО КНУ. Горизонтальний сонячний телескоп Астрономічної обсерваторії Київського національного університету імені Тараса Шевченка створено зусиллями співробітників обсерваторії П. М. Полупана, М. В. Стешенка і М. А. Яковкіна у 50-х рр. минулого століття. З того часу інструмент неодноразово модернізувався і ще й нині зберігає свою цінність для наукових досліджень. Це в основному пов'язано з тим, що він оснащений ешелічним спектрографом, який дозволяє одночасно реєструвати спектр майже всієї видимої області Сонця, від 3800 до 6600 Å, за одну експозицію тривалістю кілька секунд із досить високою спектральною роздільною здатністю, близько 30 мÅ у зеленій області спектра. Для порівняння варто сказати, що саме такою (і навіть дещо гіршою) є спектральна роздільна здатність на сучасних орбітальних сонячних обсерваторіях SOHO і Hinode, однак, там значно менша (на три порядки) широта реєстрації спектра, ніж на ГСТ. Це означає, що в той час як на ГСТ АО КНУ можна реєструвати одночасно тисячі спектральних ліній, на вказаних орбітальних обсерваторіях реєструються одночасно лише 2–3 лінії. А саме одночасний аналіз дуже багатьох спектральних ліній є суттєво важливим для вивчення складних проявів сонячної активності, які мають велику протяжність за висотою – від фотосфери до сонячної корони.

Відповідь на питання "чому на ГСТ АО КНУ можна одночасно зареєструвати тисячі спектральних ліній, тоді як на орбітальних обсерваторіях лише 2–3?" така. ГСТ АО КНУ побудований за класичною схемою, з використанням дифракційної ґратки, розвідної призми і фокусувальних дзеркал із великими фокусними відстанями, до 12,5 м. Це означає, що аналогічний інструмент на орбітальній обсерваторії мав би великі габарити, що можна, звичайно, реалізувати на практиці, але це є досить затратним і економічно не вигідним. Тому на сучасних орбітальних обсерваторіях (а також на нових великих наземних телескопах) використовують дуже компактні спектральні монохроматори на основі інтерферометрів Майкельсона і Фабрі – Перо. Маючи досить невеликі розміри (менше метра), вони мають одночасно і дуже малу область дисперсії, тобто малу протяжність тієї спектральної ділянки, в якій отримуються чіткі зображення спектральних ліній.

Нині в Україні є лише два діючі сонячні телескопи: ГСТ АО КНУ і АЦУ-5 ГАО НАН України. Однак останній телескоп не має ешелюного спектрографа і дозволяє за одну експозицію зареєструвати значно вужчу спектральну область – лише кілька ангстрем. Ще однією перевагою ГСТ є те, що він побудований за оптичною схемою, яка мінімізує інструментальну поляризацію і вплив розсіяного світла у спектрографі. Для цього всі кути падіння на оптичні дзеркала зведено до мінімуму (менші за 5°), а кут дифракції для ешелюної ґратки дорівнює 30° , що значно меншим за кут Брюстера, при якому виникає повна інструментальна поляризація відбитого світла.

Забезпечена на ГСТ можливість одночасної реєстрації всього сонячного спектра в інтервалі 3800–6600 Å реалізується поки що традиційним способом – фотографуванням спектрів на великі фотопластинки розміром 24×24 і 18×24 см фірми ORWO. Такі фотопластинки мають велику інформаційну наповнюваність, яка на два порядки більша, ніж найбільші нині CCD-матриці. Водночас, наявна конструкція ГСТ дозволяє легко переходити на фотоелектричну реєстрацію спектрів, причому одночасно в багатьох різних спектральних діапазонах.

Телескоп оснащено спектрогеліоскопом і фотогідом, які дозволяють спостерігати Сонце у світлі лінії H α , а також утримувати зображення Сонця на вхідній щілині спектрографа. Наявність спектрогеліоскопа на ГСТ важливо для раннього виявлення на ньому процесів активності на хромосферному рівні. Спектрогеліоскоп можна налаштувати на спостереження Сонця також в інших лініях, наприклад D3 HeI, D1, D2 NaI тощо. У цьому його суттєва перевага перед існуючими H-альфа фільтрами різних типів (інтерференційно-поляризаційних, на основі еталона Фабрі – Перо), які налаштовуються на спостереження Сонця лише в одній якійсь спектральній лінії. Спектрогеліоскоп має у своїй основі невеликий дифракційний спектрограф, обертову призму Андерсена, а також невеликий допоміжний телескоп. У разі швидкого обертання призми перед вхідною щілиною спектрографа завдяки роботі електродвигуна, в полі зору спектрогеліоскопа з'являється "королівська" зона одразу всього Сонця, що важливо для одночасних спостережень змін активності у різних активних областях, розкиданих по всьому диску Сонця. Телескоп спектрогеліоскопа можна з'юстувати так, що як тільки сонячний спалах потрапляє на хрест із тонких ниточок у центрі поля зору спектрогеліоскопа, то цей спалах наводиться одночасно і на вхідну щілину основного ешелюного спектрографа ГСТ АО КНУ. Щоб здійснити таке наведення, на інструменті є електронний пульт управління дзеркалами целостата, а також пульт управління експозиціями для фотографування спектрів.

Фотогид призначено для утримання на вхідній щілині спектрографа зображення вибраної ділянки на Сонці. Він складається із ще одного допоміжного телескопа і механіко-електронного блока, який діє в автоматичному режимі згідно з принципом вирівнювання фотострумів від двох пар фотодіодів, розміщених у чотирьох протилежних точках на зображенні сонячного лімба. У процесі гідуювання сигнал розбалансування від вказаних пар фотодіодів відпрацьовується кроковими двигунами, що дозволяє утримувати зображення Сонця на вхідній щілині з досить високою точністю, яка доходить до 1 с дуги (це залежить від ступеня дрижання зображення на інструменті).

Поляризаційна оптика (мозаїка В. Й. Скоморовського, призма Волластона і чвертьхвильові пластинки) забезпечує можливість аналізу поляризованого світла, що особливо важливо під час вимірювань сонячних магнітних полів у ефектах Зеємана і Пашена – Бака.

ГСТ АО КНУ нині є діючим інструментом, спостережені дані з якого зберігають свою наукову цінність, незважаючи на те, що сонячні телескопи деяких інших обсерваторій мають значно більші вхідні апертури (тобто діаметр головного дзеркала), а також діаметри інших фокусувальних дзеркал. Це обумовлено тим, що практична цінність сонячних телескопів, як зазначено вище, визначається за сукупністю багатьох характеристик, а саме таких: (1) просторова, (2) часова, (3) спектральна роздільна здатність, (4) широта одночасної реєстрації спектра, (5) відношення сигнал/шум реєструвальної апаратури, (6) можливість аналізу поляризованого випромінювання, (7) рівень інструментальної поляризації, (8) можливість спостережень на інструменті в режимі моніторингу, (9) астроклімат у місці розташування інструмента. З наведеного переліку характеристика (4) є кращою серед світових аналогів, а характеристики (2), (3), (6), (7) і (8) є близькими до таких аналогів.

Про те, що астрономічні спостереження, отримані на ГСТ АО КНУ, зберігають і нині значну наукову цінність, свідчать публікації співробітників обсерваторії у рейтингових міжнародних журналах, таких як Monthly Notices of the Royal Astronomical Society і Monthly Notices of the Royal Astronomical Society Letters (журнали квартилю Q1), Solar Physics (Q2), Advances in Space Research (Q2) тощо.

На спостережному матеріалі, отриманому на ГСТ АО КНУ, захищено близько десяти кандидатських і дві докторські дисертації. Зокрема, це докторські дисертації Л. М. Курочки (захищена 1994 р.) і В. Г. Лозицького (захищена 2003 р.). На основі аналізу матеріалу з ГСТ виконано також багато курсових і дипломних робіт студентів фізичного факультету Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Тільки за останні три роки це були кваліфікаційні дипломні роботи таких студентів-астрономів: Єлизавети Кравченко, Анастасії Сізової і Максима Громова. 2023 р. на цьому інструменті проходила навчально-виробничу практику студентка четвертого курсу кафедри астрономії і фізики космосу Марія Казеєва; тема її наукової роботи така: "Порівняння магнітних полів у сонячній плямі, виміряних по лініях натрію і нікелю". Спостережний матеріал для виконання цієї роботи отримано на ГСТ АО КНУ також 2023 р. Спільно з названими студентами опубліковано чотири статті у фахових журналах, причому одна з них (з Максимом Громовим) – у журналі з бази SCOPUS.

Найінтенсивніше працює зі спостережним матеріалом, отриманим на ГСТ, аспірант Іван Яковкін. Ним опубліковано за останні 5 років близько 10 статей у фахових журналах, причому у 2021–2023 рр. – чотири статті в журналах кuartилів Q1 і Q2. Результати двох із цих статей (Yakovkin, & Lozitsky, 2022; 2023) наведено нижче.

Враховуючи наведені вище обставини, 2021 р. ГСТ АО КНУ було надано статус національного надбання (Постанова Кабінету міністрів України № 1206 від 10.11.2021 р.).

Наукові плани і методи дослідження

Наукові плани щодо подальших спостережень на ГСТ стосуються в основному трьох напрямів *продовження спектродіагностичних досліджень активних процесів на Сонці в багатьох спектральних лініях і в широкому діапазоні довжин хвиль (5–30 Å) в околі вибраних магніточутливих ліній*. Завдяки цьому можна вивчати магнітні поля й інші фізичні умови в широкому діапазоні висот – від фотосфери до перехідної зони між хромосферою і короною. За такого підходу, можна вимірювати магнітні поля до 10^5 Гс, а променеві швидкості – до 1500 км/с. Для порівняння варто нагадати, що всі орбітальні сонячні обсерваторії фіксують спектродіагностичні ефекти у значно вузкому спектральному діапазоні, наприклад, SOHO/MDI – в діапазоні лише 0,2 Å, тобто швидкості – до 4 км/с (Scherrer et al., 1995). Найбільший нині 4,2-метровий наземний сонячний телескоп оснащено фільтрами Фабрі – Перо з діапазоном дисперсії лише 10 Å (Quintero Noda et al., 2022).

Основним науковим завданням у цьому напрямі може бути визначення локальних характеристик магнітних полів в активних процесах на Сонці і подальше розроблення проблеми екстремально сильних полів ($> 10^3$ Гс). На перший погляд, таке формулювання наукового завдання є сумнівним, з огляду на те, що реальна просторова роздільна здатність прямих спостережень на ГСТ, зазвичай, становить 2–3 Мм і лише зрідка наближається до 1 Мм. Адже домінує уявлення, що для визначення локальних характеристик потрібно мати спостереження з максимально високим просторовим розділенням – наприклад, 50 км або ще менше. Проте, за влучним висловом Яна Стенфло, це є метод "грубої сили". Такий метод може дати достовірні результати лише тоді, коли просторове розділення при прямих спостереженнях дозволить розділити найдрібніші магнітні структури на Сонці. Нині дійсні діаметри цих структур оцінюють у діапазоні 10–70 км (Stenflo, 2011), тобто сучасні телескопи навіть при розділенні 50 км (Campbell et al., 2023) ще не розділяють повністю найменші структури. Але саме в них, як сказано вище, можна очікувати найсильніші магнітні поля.

Тоншим є непрямий метод "відношення ліній" (Stenflo, 1973), який дозволяє оцінити локальні магнітні поля за допомогою моделювання, використовуючи багатокомпонентні моделі. Для цього варто порівняти спектродіагностичні вимірювання у парі спектральних ліній одного мультиплету, з однаковою силою осцилятора і потенціалами збудження нижнього терму, але із суттєво різними факторами Ланде. Такі лінії, як можна очікувати, формуються на однаковій висоті в атмосфері Сонця і мають однакову температурну чутливість. Стенфло 1973 р. використовував для цього лінії FeI 5247.1 і 5250.2 з факторами Ланде 2.0 і 3.0, відповідно (Stenflo, 1973). Використовуючи магнітографічні спостереження спокійних областей на Сонці з просторовим розділенням 2.3×2.3 с дуги (тобто приблизно тим самим, як і спостереження на ГСТ АО КНУ), Я. Стенфло дійшов висновку, що навіть за межами сонячних плям напруженості магнітного поля досягають значень (1,1–2,3 кГс), зосереджені у дуже тонких (просторово нероздільних) структурах, названих трубками потоку (fluxtubes). Цей висновок пізніше підтверджено іншими дослідниками, які використовували вище просторове розділення (Campbell et al., 2023). Щодо спостережень на ГСТ, то було б цікаво застосувати метод "відношення ліній" також в інших придатних для цього парах ліній видимої області спектра, зокрема й у парі хромосферних ліній D1 і D2 NaI.

Локальні магнітні поля можна виміряти при низькому просторовому розділенні навіть по одній спектральній лінії, якщо ці магнітні поля настільки сильні, що реалізується режим сильного магнітного поля. У цьому режимі величина зєєманівського розщеплення більша за спостережену ширину спектральної лінії, і тоді протилежно поляризовані сигма-компоненти видно окремо від цієї спектральної лінії. Інтенсивність (спектральний контраст) цих сигма-компонент залежить в основному від фактора заповнення, а не від прямого просторового розділення. У деяких випадках (напр., у сонячних спалахах) фактор заповнення може бути настільки великим, що ці спектральні прояви особливо сильних магнітних полів є достовірно видимими у спектрі навіть у фотографічному методі реєстрації спектра. Відповідні результати представлено нижче на основі робіт (Yakovkin, & Lozitsky, 2022; 2023), однак цей ефект за даними з ГСТ АО КНУ був опублікований також в інших статтях і для інших активних процесів на Сонці.

Візуальні вимірювання модуля напруженості магнітного поля в тінях (ядрах) великих сонячних плям – це один перспективний напрям досліджень із використанням ГСТ АО КНУ. Такі вимірювання можуть бути основою для важливого геліомагнітного індексу V_{sp} , запропонованого Н. Й. Лозицькою 2002 р. (Lozitska, 2005). Цей індекс визначають як середньорічну напруженість магнітного поля у сонячних плямах діаметра 30–60 с дуги (22–44 Мм). Для таких великих сонячних плям, які за розміром приблизно на порядок перевищують величину дрижання зображення під час спостережень на ГСТ, можна отримати цілком достовірні дані вимірювань, що показує їхнє порівняння з даними інших обсерваторій. Відповідні дані представляють собою інтенсивну характеристику сонячного магнетизму, яка визначається за незмінною методикою вже більше 100 років, починаючи з роботи (Hale, 1908). На противагу цьому, отримувати з орбітальних обсерваторій SOHO і SDO магнітограми представляють не саму по собі напруженість магнітного поля, а складну функцію багатьох параметрів, яка залежить від локальних і фонових магнітних полів, фактора заповнення локальних полів, нахилу силових ліній до променя зору тощо.

Екологічний моніторинг земної атмосфери методами сонячної спектроскопії. У 1990-х рр. в АО КНУ проводили спостереження на ГСТ спектра Сонця при дуже низькому його положенні відносно горизонту, до висоти Сонця близько 1° . Причому повітряна маса зростала більш ніж на порядок і дуже підсилювалась у спектрі телуричної лінії, зокрема й лінії і смуги деяких малих газів, таких як: NO_2 , O_3 тощо. Щоб спостерігати Сонце за таких малих висот, на даху високої будівлі адміністративного корпусу обсерваторії ставили плоске дзеркало, і промінь від нього спрямовувався на дзеркало целостата, а звідти – у спектрограф. Матеріали цих досліджень опубліковано в серії статей, зокрема в роботі (Lozitsky et al., 1994). Такі дослідження можна було б відновити, якби була придбана сучасна CCD-камера типу, наприклад, SBIG STF-8300. Тоді не потрібно було б спостерігати Сонце за дуже низьких його положень відносно горизонту – було б достатньо вести відповідні вимірювання для будь-яких його зенітних віддалей.

Результати

У цьому розділі наведено для ілюстрації лише деякі результати з посиланням на дуже обмежену кількість публікацій. Фактична ж кількість публікацій по вказаних нижче наукових напрямках наближається до 100.

Екстремально сильні магнітні поля у сонячних спалахах. Спектральні ефекти, що вказують на існування таких полів, виявлено недавно в лінії Н-альфа (Yakovkin, & Lozitsky, 2022), а також D3 HeI (Yakovkin, & Lozitsky, 2023). Зокрема, за даними спостережень на ГСТ АО КНУ виявлено достовірну циркулярну поляризацію протилежного знака в далеких крилах лінії D3 HeI (на віддальх 2,7–4,5 Å від її центра) у лімбовому сонячному спалаху 10 червня 2014 р. бала X1.5, яка, найімовірніше, вказує на магнітні поля діапазону порядку 10^5 Гс (рисунок). Для обґрунтування цієї інтерпретації, І. Яковкіним досліджено теоретичні особливості ефекту Пашена – Бака в магнітних полях до 100 кГс. Виявилось, що в таких полях спектральна ширина компонентів розщеплення лінії D3 відносно невелика, 0,3 Å, тоді як ширина спостережуваних піків іноді значно більша, що може вказувати на значну дисперсію напруженостей у спалахах. На основі модельних розрахунків (виконаних також І. Яковкіним) показано, що в деяких випадках можливе альтернативне пояснення вказаних спостережень, яке включає значно слабші магнітні поля (5,5–7,1 кГс), але значні макроскопічні швидкості різних знаків, на рівні 50–60 км/с. Суттєво те, що спостережні ознаки таких особливо сильних полів зареєстровано на досить великих висотах, до 10–20 Мм.

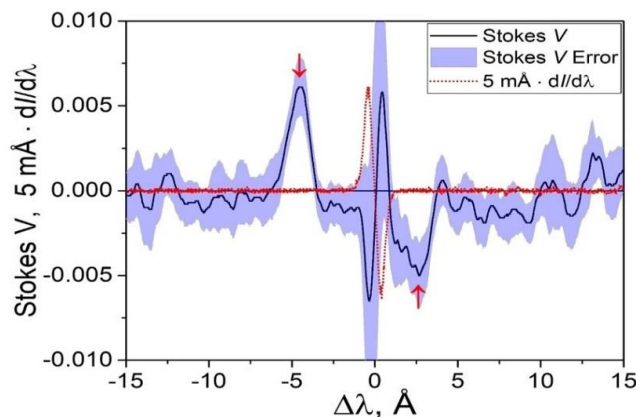


Рисунок. Профіль Стокса V лінії D3 HeI у лімбовому сонячному спалаху 10 червня 2014 р., усереднений по діапазону висот 7 Мм, від 2 до 8 Мм. Для порівняння зображено пунктиром також параметр $d\lambda/d\lambda$, який показує очікувану форму параметра V для режиму слабого магнітного поля, що для лінії D3 відповідає напруженостям до 10^3 Гс. Червоними стрілочками показано вторинні піки параметра V різного знака, які відповідають напруженості 2.2×10^5 Гс (Yakovkin, & Lozitsky, 2023)

Зміни модуля напруженості магнітного поля у сонячних плямах діаметра 22–44 Мм. Найдовші й однорідні ряди вимірювань модуля магнітного поля у плямах отримано завдяки візуальним вимірюванням у різних обсерваторіях (зокрема і в Україні, Росії та США). Вказані вимірювання, однак, для плям різних розмірів і за неоднакових астрокліматичних умов можуть мати суттєві похибки, і це варто враховувати під час аналізу даних. Проведено аналіз впливу інструментальних та астрокліматичних факторів на результати вимірювань. Досліджено величину дрижання краю диска Сонця. Зранку типова величина дрижання зображення на ГСТ АО КНУ становила від 2" до 4", що приблизно у 10 разів менша за розміри тих плям (30–60"), які обрано для моніторингу. Оскільки в центральній частині таких плям залишається ділянка, в яку не потрапляє світло з північ при дрижанні, вимірювання магнітних полів таких плям на нашому інструменті у більшості випадків достовірні. Виявлено і досліджено денний хід вимірюваних напруженостей магнітного поля у сонячних плямах (Лозицька, 2011).

Знайдено, що застосування поляризаційної мозаїки зменшує вимірні напруженості на 5–10 % порівняно з результатом, одержаним із призмою Воластона і пластинкою $\lambda/4$. Після порівняння різних способів вимірювання зееманівських зміщень за допомогою лайншифтера (зокрема і в режимах " $\sigma \rightarrow \sigma$ " чи " $\sigma \rightarrow \pi$ ") виявлено, що в середньому вимірні значення поля були практично однаковими для всіх способів вимірювання. Помічено також, що дані різних вимірювань краще узгоджуються в центральній зоні диска ($r/R_{\odot} < 0,65$), тоді як поблизу лімба наростають відмінності як внаслідок підсилення центральної π -компоненти, так і внаслідок ефекту Евершеда. Тому краще у процесі усереднення довгих рядів даних для збереження їхньої однорідності використовувати вимірювання у сонячних плямах, які спостерігались у центральній зоні диска Сонця.

Для візуальних вимірювань магнітних полів плям використовували кілька магніточутливих ліній. Показано, що об'єднання рядів спостережень у лініях FeI 5250.2 та FeI 6302.5 Å не створює систематичні відмінності, більші за 60 Гс. Це обумовлено незначною різницею висот формування цих ліній (≤ 60 км). Уточнено калібровку лайншифтера ГСТ АО КНУ, який використовують для вимірювання зееманівських зміщень у сонячному спектрі. Для цього застосовувались тісні пари вузьких телуричних ліній O_2 в області довжин хвиль 6276–6280 Å, а також тісні пари вузьких ліній металів в області довжин хвиль 5220–5274 Å.

На основі вимірювань на ГСТ АО КНУ, а також даних інших обсерваторій (в основному КрАО та Маунт-Вілсон) встановлено, що середньорічна напруженість магнітного поля у сонячних плямах із діаметром північ в межах 22–44 Мм змінюється складним чином, не повторюючи зміни чисел Вольфа (Lozitska, 2011).

Виявилось, що із цими змінами параметра B_{sp} тісно корелюють зміни приземної температури на Землі. Крім того, у вказаних змінах проявляється подвійний цикл Хейла (приблизно 44 роки) – це видно з того, що найглибші мінімуми

цього параметра наступають саме через 44 роки. Реальність цього циклу встановлено пізніше й іншим методом – на основі вивчення інтегральних залежностей для діаметрів сонячних плям (<https://doi.org/10.1016/j.asr.2018.03.012>). Ці результати важливі для розвитку теорії сонячного магнетизму й у проблемі глобального потепління в сучасну епоху.

Екологічний моніторинг земної атмосфери методами сонячної спектроскопії. У роботі (Lozitsky et al., 1994) показано, що сезонні зміни NO₂ в повітряному басейні Києва змінюються у протифазі зі змінами озону. Завдяки використанню ешельних спектрограм, на яких одночасно фіксується майже вся видима область (3800–6600 Å), можна досліджувати також зміни інших газів. Зазначено, що представляють значний інтерес не лише малі гази, а й молекулярний кисень O₂, який є своєрідним "золотим запасом" в атмосфері великого промислового міста. Показано, що на початку 1990-х рр. концентрація кисню в атмосфері над Києвом суттєво не змінювалась.

Дискусія і висновки

Найвагомішим науковим результатом із тих спостережень, які проведені на ГСТ АО КНУ, з погляду автора, є висновок про існування в активних процесах на Сонці екстремально сильних магнітних полів діапазону 10⁴–10⁵ Гс. Цей висновок зроблено вперше ще 30 років тому й опубліковано в журналі "Кінематика і фізика небесних тіл", який нині належить до квартилю Q4. Можливо цим пояснюється те, що вказаний висновок не зацікавив широку наукову громадськість – адже цей журнал не має такого високого рейтингу, як інші міжнародні журнали вищих квартилів. Іншою причиною може бути те, що цей висновок зроблено на основі спостережень, переважно, спектральних ефектів у лінії FeI 5434.5, яка має дуже малий фактор Ланде (приблизно 0,01), визначений емпірично в лабораторних умовах. Відповідні ефекти (розщеплення емісійних піків у ядрі цієї лінії) іноді спостерігають у потужних сонячних спалахах бала X. На спостережному матеріалі, отриманому на ГСТ впродовж останніх чотирьох 11-річних сонячних циклів, це виявлено лише у п'яти сонячних спалахах, зокрема й у винятково потужному спалаху 28 жовтня 2003 р. бала X17.2/4B. Оскільки відповідний ефект спостерігається дуже нечасто і до того ж у спектральній лінії, яка більшістю фахівців вважається "немагнітною", то це могло бути причиною відсутності інтересу й підтвердження чи спростування його в роботах інших дослідників.

З огляду на зазначене, автор кілька років тому вирішив підійти до проблеми з іншого боку – тим шляхом, який є більш звичним для більшості фахівців у цій галузі. А саме: здійснити пошуки відповідних характерних ознак у добре відомих лініях, зокрема H-альфа і D3. Доречно нагадати, що в лінії D3 ведуть дослідження на такому сучасному інструменті, як спектроскоп SST/CRISP, правда, у вузькому інтервалі віддалей від центра: від –1 до +1,5 Å (Libbrecht T. et al., 2019). (Як уже зазначено вище, для пошуків особливо сильних полів варто детально вивчати ширші спектральні інтервали). При цьому методичному підході, перші ознаки особливо сильних полів із напруженістю близько 90 кГс виявлено у лімбовому сонячному спалаху 14 липня 2005 р. на основі аналізу тонких ефектів у лінії H-альфа на віддальх 1–4 Å від її центра (Yakovkin, & Lozitsky, 2022). Відповідну наукову статтю опубліковано в журналі квартилю Q2 лише рік тому, однак за цей час, згідно з даними мережі для науковців Research Gate, вона вже має 9 цитат і 7 рекомендацій. Відмічено також певний (але не вибуховий) інтерес і до статті на цю саму тему в MNRAS (Yakovkin, & Lozitsky, 2023), в якій представлено аналогічні дані, отримані в лінії D3 (див. рисунок і пояснення до нього).

Підсумовуючи сказане вище і з огляду також на інші результати автора в цьому напрямі, які не розглянуті внаслідок обмеженого обсягу цієї статті, можна сказати, що у проблемі екстремально сильних магнітних полів на Сонці, схоже, настає момент істини. Нині отримано досить багато спостережливих свідчень щодо існування таких полів, але поки що немає ні підтвердження, ні спростування їх у роботах інших дослідників. У журналах квартилів Q1 і Q2 викладено методичні основи щодо пошуків таких полів, які, як можна сподіватись, дуже швидко приведуть до цілком визначеного результату інших дослідників. Якщо існування таких надсильних полів у дуже розрідженій сонячній плазмі буде підтверджено, це вимагатиме суттєвого перегляду МГД теорії їхнього утворення, підтримання і дисипації. Можливо, з відповідного погляду стане зрозумілішою проблема суттєвого нагрівання сонячної хромосфери і корони.

Можна також сподіватися, що дослідження в цьому напрямі дозволять знайти розв'язання такої важливої проблеми: як у сучасних експериментальних установках для термоядерного синтезу (типу токамаків) досягти суттєвого прогресу в отриманні великих обсягів екологічно чистої енергії. Адже дуже сильне магнітне поле, яке доводиться використовувати для утримання плазми в токамаках, значно охолоджує плазму і тим самим – суттєво знижує імовірність тунельного ефекту, необхідного для утворення важчих ядер. Можливо, подальші дослідження особливо сильних магнітних полів на Сонці відкриють такі їхні особливості, що будуть корисними для розв'язання цієї проблеми. Зокрема, оскільки дуже сильні й дискретні за величиною магнітні поля можуть існувати, теоретично, в аксіально-симетричних багатшарових структурах із тісним контактом протилежних магнітних полярностей, то можуть виникати такі конфігурації, де області особливо сильного поля і найбільш високої концентрації плазми є рознесеними просторово, тобто там у певних місцях може виконуватись необхідна умова для інтенсивної термоядерної реакції. Це варто перевірити у подальших дослідженнях.

Значно зрозумілішим є питання, сформульоване в назві статті – про можливість наукових досліджень із таким скромним і давно побудованим інструментом, як ГСТ АО КНУ. Як показано вище, навіть на такому інструменті можна проводити вартісні спектральні спостереження сонячної активності й екологічного стану земної атмосфери (особливо в режимі моніторингу), які відповідають вимогам сучасного стану науки у відповідних її галузях.

Подяки і джерела фінансування. Представлене дослідження профінансовано Міністерством освіти і науки України, проект № 22БФ023-03.

Список використаних джерел

- Лоцицька, Н. Й. (2011). Вікові варіації магнітних полів сонячних плям та їх прояви у міжпланетному просторі та геосфері [Автореф. дис. канд. фіз.-мат.-наук, ГАО НАН України]. https://www.mao.kiev.ua/biblio/docs/special/2011-10-27_Lozitska_aref.pdf.
- Alfven, H., & Fälthammar, C.-G. (1963). *Cosmical Electrodynamics – Fundamental Principles*. 2nd edition. Oxford University Press.
- Anfinogenov, S. A., Stupishin, A. G., Mysh'akov, I. I., & Fleishman, G. D. (2019). Record-breaking coronal magnetic field in solar active region 12673. *The Astrophysical Journal Letters*, 880, article id. L29, 5 p.
- Campbell, R. J., Keys, P. H., Mathioudakis, M., Woeger, F., Schad, T. A., Tritschler, A., Wijn, de A. G., Smitha, H. N., Beck, C. A., Christian, D. J., Jess, D. B., & Erdelyi, R. (2023). DKIST unveils the serpentine topology of quiet Sun magnetism in the photosphere. *arXiv:2309.05836 [astro-ph.SR]*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2309.05836>.

- ChangHui Rao, NaiTing Gu, XueJun Rao, Cheng Li, LanQiang Zhang, JinLong Huang, Lin Kong, Ming Zhang, YunTao Cheng, Yi Pu, Hua Bao, YouMing Guo, YangYi Liu, JinSheng Yang, LiBo Zhong, ChangJun Wang, Kai Fang, XiaoJun Zhang, DongHong Chen, ... WenLi Ma. (2020). First light of the 1.8-m solar telescope-CLST. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 63, article id.109631. <https://doi.org/10.1007/s11433-019-1557-3>.
- Puschmann K. G., Denker C., Balthasar H., Louis R. E., Popow E., Woche M., Beck Ch., Seelemann T., Volkmer R. (2013). GREGOR Fabry-Pérot interferometer and its companion the blue imaging solar spectrometer. *Optical Engineering*, 52, id. 081606. <https://doi.org/10.1117/1.OE.52.8.081606>.
- Durán, C. J. S., Lagg, A., Solanki, S. K., & van Noort M. (2020). Detection of the strongest magnetic field in a sunspot light bridge. *The Astrophysical Journal*, 895, 129–146. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab83f1>.
- Goode, P. R., & Cao W. (2012). The 1.6 m off-axis New Solar Telescope (NST) in Big Bear. *Ground-based and Airborne Telescopes IV. Proceedings of the SPIE*. Vol. 8444, article id. 844403, 8 p. <https://doi.org/10.1117/12.925494>.
- Hale, G. E. (1908). On the probable existence of a magnetic field in sunspots. *Astrophysical Journal*, 28, 315–343.
- Kleint, L. (2017). First detection of chromospheric magnetic field changes during an X1-Flare. *Astrophysical Journal*, 34, article id. 26, 10 p.
- Kuckein, C., Gonzalez Manrique, S. J., Klient, L., & Asenio Ramos, A. (2020). Determining the dynamics and magnetic fields in He I 10830 Å during a solar filament eruption. *Astronomy and Astrophysics*, 640, id. A71, 12 p.
- Kuridze, D., Mathioudakis, M., Morgan, H., Oliver, R., Keint, L., Zaqarashvili, T. V., Koza, J., Löfdahl, M. G., Hillberg, T., Kukhianidze, V., Reid, A., & Hanslmeier, A. (2019). Mapping the magnetic field of flare coronal loops. *Astrophysical Journal*, 874, article id. 126, 12 p.
- Libbrecht, T., de la Cruz Rodríguez, J., Danilovic, S., Leenaarts, J., & Pazira H. (2019). Chromospheric condensations and magnetic field in a C3.6-class flare studied via He I D3 spectro-polarimetry. *Astronomy and Astrophysics*, 621, id. A35, 21 p.
- Livingston W., Harvey J. W., & Malanushenko O. V. (2006). Sunspots with the strongest magnetic fields. *Solar Physics*, 239, 41–68.
- Lozitska, N. I. (2005). Interannual variation of sunspot magnetic fields from 1924 to 2004. *Kinematika i Fizika Nebesnykh Tel*, Suppl. 5, 151–152.
- Lozitsky, V. G., Kostenko, L. M., Lozitska, N. I., & Musatenko, S. I. (1994). Ecological monitoring of anthropogenic components of the Earth's atmosphere based on spectral observations of the Sun. *Kinematika i Fizika Nebesnykh Tel*, 10, 80–83.
- Lozitsky, V. G. (2016). Indications of 8-kilogauss magnetic field existence in the sunspot umbra. *Advances in Space Research*, 57, 398–407. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2015.08.032>.
- Quintero Noda, C., Schlichenmaier, R., Bellot Rubio, L. R., Löfdahl, M. G., Khomenko, E., Jurčák, J., Leenaarts, J., Kuckein, C., González Manrique, S. J., Gunár, S., Nelson, C. J., de la Cruz Rodríguez, J., Tziotziou, K., Tsiropoula, G., Aulanier, G., Aboudarham, J., Allegri, D., Alsina Ballester, E., Amans, J. P., ... Collados, M. (2022). The European Solar Telescope. *Astronomy and Astrophysics*, 666, A21. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202243867>.
- ChangHui Rao, NaiTing Gu, XueJun Rao, Cheng Li, LanQiang Zhang, JinLong Huang, Lin Kong, Ming Zhang, YunTao Cheng, Yi Pu, Hua Bao, YouMing Guo, YangYi Liu, JinSheng Yang, LiBo Zhong, ChangJun Wang, Kai Fang, XiaoJun Zhang, DongHong Chen, ... WenLi Ma. (2020). First light of the 1.8-m solar telescope-CLST. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 63, article id.109631. <https://doi.org/10.1007/s11433-019-1557-3>.
- Rimmele, T. R., Warner, M., Keil, S. L., Goode, P. R., Knölker, M., Kuhn, J. R., Rosner, R. R., McMullin, J. P., Casini, R., Lin, H., Wöger, F., von der Lühe, O., Tritschler, A., Davey, A., de Wijn, A., Elmore, D. F., Fehlmann, A., Harrington, D. M., Jaeggli, S. A., ... White, C. (2020). The Daniel K. Inouye Solar Telescope – Observatory Overview. *Solar Physics*, 295, article id.172. <https://doi.org/10.1007/s11207-020-01736-7>.
- Scherrer, P. H., Bogart, R. S., Bush, R. I., Hoeksema, J. T., Kosovichev, A. G., Schou, J., Rosenberg, W., Springer, L., Tarbell, T. D., Title, A., Wolfson, C. J., Zayer, I., & The MDI Engineering Team (1995). The solar oscillations investigation – Michelson Doppler Imager. *Solar Physics*, 162, 129–188.
- Stenflo, J. O. (1973). Magnetic-field structure of the photospheric network. *Solar Physics*, 32, 41–63. <https://doi.org/10.1007/BF00152728>.
- Stenflo, J. O. (2000). Summary lecture. *Journal of Astrophysics and Astronomy*, 21, 451–457. <https://doi.org/10.1007/BF02702443>.
- Stenflo, J. O. (2011). Collapsed, uncollapsed, and hidden magnetic flux on the quiet Sun. *Astronomy and Astrophysics*, 529, id. A42, 20 p. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201016275>.
- Van Noort, M., Lagg, A., Tiwari, S. K., & Solanki, S. K. (2013). Peripheral Downflows in Sunspot Penumbrae. *Astronomy and Astrophysics*, 557, id. A24, 14 p.
- Wang H., Yurchyshyn V., Liu C., Ahn K., Toriumi S., & Cao W. (2018). Strong Transverse Photosphere Magnetic Fields and Twist in Light Bridge Dividing Delta Sunspot of Active Region 12673. *Research Notes of the American Astronomical Society*, 2, article id. 8. <https://doi.org/10.3847/2515-5172/aaa670>.
- Yakovkin, I. I., & Lozitsky, V. G. (2022). Signatures of superstrong magnetic fields in a limb solar flare from observations of the H α line. *Advances in Space Research*, 69, 4408–4418. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2022.04.012>.
- Yakovkin, I. I., & Lozitsky, V. G. (2023). Search for superstrong magnetic fields in active processes on the Sun using spectro-polarimetry within 15 angstroms around the D3 line. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 523, 5812–5822. <https://doi.org/10.1093/mnras/stad1816>.

References

- Alfvén, H., & Fälthammar, C.-G. (1963). *Cosmical Electrodynamics – Fundamental Principles*. 2nd edition. Oxford University Press.
- Anfinogentov, S. A., Stupishin, A. G., Mysh'akov, I. I., & Fleishman, G. D. (2019). Record-breaking coronal magnetic field in solar active region 12673. *The Astrophysical Journal Letters*, 880, article id. L29, 5 p.
- Campbell, R. J., Keys, P. H., Mathioudakis, M., Woeger, F., Schad, T. A., Tritschler, A., Wijn, de A. G., Smitha, H. N., Beck, C. A., Christian, D. J., Jess, D. B., & Erdelyi, R. (2023). DKIST unveils the serpentine topology of quiet Sun magnetism in the photosphere. [arXiv:2309.05836 \[astro-ph.SR\]](https://doi.org/10.48550/arXiv.2309.05836). <https://doi.org/10.48550/arXiv.2309.05836>.
- ChangHui Rao, NaiTing Gu, XueJun Rao, Cheng Li, LanQiang Zhang, JinLong Huang, Lin Kong, Ming Zhang, YunTao Cheng, Yi Pu, Hua Bao, YouMing Guo, YangYi Liu, JinSheng Yang, LiBo Zhong, ChangJun Wang, Kai Fang, XiaoJun Zhang, DongHong Chen, ... WenLi Ma. (2020). First light of the 1.8-m solar telescope-CLST. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 63, article id.109631. <https://doi.org/10.1007/s11433-019-1557-3>.
- Puschmann K. G., Denker C., Balthasar H., Louis R. E., Popow E., Woche M., Beck Ch., Seelemann T., Volkmer R. (2013). GREGOR Fabry-Pérot interferometer and its companion the blue imaging solar spectrometer. *Optical Engineering*, 52, id. 081606. <https://doi.org/10.1117/1.OE.52.8.081606>.
- Durán, C. J. S., Lagg, A., Solanki, S. K., & van Noort M. (2020). Detection of the strongest magnetic field in a sunspot light bridge. *The Astrophysical Journal*, 895, 129–146. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab83f1>.
- Goode, P. R., & Cao W. (2012). The 1.6 m off-axis New Solar Telescope (NST) in Big Bear. *Ground-based and Airborne Telescopes IV. Proceedings of the SPIE*. Vol. 8444, article id. 844403, 8 p. <https://doi.org/10.1117/12.925494>.
- Hale, G. E. (1908). On the probable existence of a magnetic field in sunspots. *Astrophysical Journal*, 28, 315–343.
- Kleint, L. (2017). First detection of chromospheric magnetic field changes during an X1-Flare. *Astrophysical Journal*, 834, article id. 26, 10 p.
- Kuckein, C., Gonzalez Manrique, S. J., Klient, L., & Asenio Ramos, A. (2020). Determining the dynamics and magnetic fields in He I 10830 Å during a solar filament eruption. *Astronomy and Astrophysics*, 640, id. A71, 12 p.
- Kuridze, D., Mathioudakis, M., Morgan, H., Oliver, R., Keint, L., Zaqarashvili, T. V., Koza, J., Löfdahl, M. G., Hillberg, T., Kukhianidze, V., Reid, A., & Hanslmeier, A. (2019). Mapping the magnetic field of flare coronal loops. *Astrophysical Journal*, 874, article id. 126, 12 p.
- Libbrecht, T., de la Cruz Rodríguez, J., Danilovic, S., Leenaarts, J., & Pazira H. (2019). Chromospheric condensations and magnetic field in a C3.6-class flare studied via He I D3 spectro-polarimetry. *Astronomy and Astrophysics*, 621, id. A35, 21 p.
- Livingston W., Harvey J. W., & Malanushenko O. V. (2006). Sunspots with the strongest magnetic fields. *Solar Physics*, 239, 41–68.
- Lozitska, N. I. (2005). Interannual variation of sunspot magnetic fields from 1924 to 2004. *Kinematika i Fizika Nebesnykh Tel*, Suppl. 5, 151–152.
- Lozitska N. I. (2011). Secular variations of the sunspot magnetic fields and their manifestations in the interplanetary space and geosphere [Manuscript PhD, Main Astronomical Observatory of National Academy of Sciences of Ukraine] [in Ukrainian]. https://www.mao.kiev.ua/biblio/docs/special/2011-10-27_Lozitska_oref.pdf.
- Lozitsky, V. G., Kostenko, L. M., Lozitska, N. I., & Musatenko, S. I. (1994). Ecological monitoring of anthropogenic components of the Earth's atmosphere based on spectral observations of the Sun. *Kinematika i Fizika Nebesnykh Tel*, 10, 80–83.
- Lozitsky, V. G. (2016). Indications of 8-kilogauss magnetic field existence in the sunspot umbra. *Advances in Space Research*, 57, 398–407. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2015.08.032>.
- Quintero Noda, C., Schlichenmaier, R., Bellot Rubio, L. R., Löfdahl, M. G., Khomenko, E., Jurčák, J., Leenaarts, J., Kuckein, C., González Manrique, S. J., Gunár, S., Nelson, C. J., de la Cruz Rodríguez, J., Tziotziou, K., Tsiropoula, G., Aulanier, G., Aboudarham, J., Allegri, D., Alsina Ballester, E., Amans, J. P., ... Collados, M. (2022). The European Solar Telescope. *Astronomy and Astrophysics*, 666, A21. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202243867>.
- ChangHui Rao, NaiTing Gu, XueJun Rao, Cheng Li, LanQiang Zhang, JinLong Huang, Lin Kong, Ming Zhang, YunTao Cheng, Yi Pu, Hua Bao, YouMing Guo, YangYi Liu, JinSheng Yang, LiBo Zhong, ChangJun Wang, Kai Fang, XiaoJun Zhang, DongHong Chen, ... WenLi Ma. (2020). First light of the 1.8-m solar telescope-CLST. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 63, article id.109631. <https://doi.org/10.1007/s11433-019-1557-3>.

- Rimmele, T. R., Warner, M., Keil, S. L., Goode, P. R., Knölker, M., Kuhn, J. R., Rosner, R. R., McMullin, J. P., Casini, R., Lin, H., Wöger, F., von der Lühe, O., Tritschler, A., Davey, A., de Wijn, A., Elmore, D. F., Fehlmann, A., Harrington, D. M., Jaeggli, S. A., ... White, C. (2020). The Daniel K. Inouye Solar Telescope – Observatory Overview. *Solar Physics*, 295, article id.172. <https://doi.org/10.1007/s11207-020-01736-7>.
- Scherrer, P. H., Bogart, R. S., Bush, R. I., Hoeksema, J. T., Kosovichev, A. G., Schou, J., Rosenberg, W., Springer, L., Tarbell, T. D., Title, A., Wolfson, C. J., Zayer, I., & The MDI Engineering Team (1995). The solar oscillations investigation – Michelson Doppler Imager. *Solar Physics*, 162, 129–188.
- Stenflo, J. O. (1973). Magnetic-field structure of the photospheric network. *Solar Physics*, 32, 41–63. <https://doi.org/10.1007/BF00152728>.
- Stenflo, J. O. (2000). Summary lecture. *Journal of Astrophysics and Astronomy*, 21, 451–457. <https://doi.org/10.1007/BF02702443>.
- Stenflo, J. O. (2011). Collapsed, uncollapsed, and hidden magnetic flux on the quiet Sun. *Astronomy and Astrophysics*, 529, id. A42, 20 p. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201016275>.
- Van Noort, M., Lagg, A., Tiwari, S. K., & Solanki, S. K. (2013). Peripheral Downflows in Sunspot Penumbrae. *Astronomy and Astrophysics*, 557, id. A24, 14 p.
- Wang H., Yurchyshyn V., Liu C., Ahn K., Toriumi S., & Cao W. (2018). Strong Transverse Photosphere Magnetic Fields and Twist in Light Bridge Dividing Delta Sunspot of Active Region 12673. *Research Notes of the American Astronomical Society*, 2, article id. 8. <https://doi.org/10.3847/2515-5172/aaa670>.
- Yakovkin, I. I., & Lozitsky, V. G. (2022). Signatures of superstrong magnetic fields in a limb solar flare from observations of the H α line. *Advances in Space Research*, 69, 4408–4418. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2022.04.012>.
- Yakovkin, I. I., & Lozitsky, V. G. (2023). Search for superstrong magnetic fields in active processes on the Sun using spectro-polarimetry within 15 angstroms around the D3 line. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 523, 5812–5822. <https://doi.org/10.1093/mnras/stad1816>.

Отримано редакцією журналу/Received: 17.11.23

Прорецензовано / Revised: 15.12.23

Схвалено до друку / Accepted: 19.12.23

Vsevolod LOZITSKY, DSc (Phys. & Math.)

ORCID ID: 0000-0002-6895-5271

e-mail: vsevolod.lozitsky@knu.ua

Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

POSSIBILITIES OF ASTRONOMICAL AND ECOLOGICAL RESEARCH WITH HORIZONTAL SOLAR TELESCOPE OF AO KNU – AN OBJECT OF NATIONAL PROPERTY

Background. *The appearance in recent years of large solar telescopes, which achieve a spatial resolution of up to 50 km on the Sun, exacerbates the question of the feasibility of using much smaller solar telescopes. The presented work argues the thesis that even medium and relatively small solar telescopes can provide important information that corresponds to the current level of science in the fields of astronomy and environmental research. This is due to the fact that for spectral-polarization studies of active processes on the Sun, not only direct spatial resolution is critically important, but also spectral resolution and the width of simultaneous spectrum registration. At the same time, high spectral resolution can to some extent compensate for insufficiently high spatial resolution. The purpose of the presented work was to highlight specific methodological approaches and results in the specified scientific directions using the example of the horizontal solar telescope of the Astronomical Observatory of Taras Shevchenko National University of Kyiv (hereinafter - HST AO KNU), which recently received the status of an object of national heritage.*

Methods. *The spectral-polarization method was mainly used for analysis of observational data in many spectral lines formed in the "photosphere-lower corona" height range. The local characteristics of the magnetic fields on the Sun were determined both by the direct method (for sunspots) and by analyzing subtle effects in the distant wings and the nearby spectral continuum of H-alpha and D3 helium lines (for solar flares). In the latter case, the local characteristics of the magnetic field and the velocity field were also estimated by simulation.*

Results. *According to the observations with the HST of AO KNU, a reliable circular polarization of the opposite sign was found in the far wings of H-alpha and D3 Hel lines in two powerful solar flares of X class, which most likely indicates magnetic fields of 10⁵ G range. To justify this interpretation, theoretical features of the Paschen-Back effect in magnetic fields up to 100 kG were investigated by Ivan Yakovkin. It turned out that at such fields the spectral width of the splitting components of the D3 line is relatively small, 0.3 Å, while the width of the observed peaks is sometimes much larger, which may indicate a significant dispersion of the magnetic field intensities in the flares. On the basis of model calculations, it is shown that in some cases an alternative explanation of the observed data is possible, which includes much weaker magnetic fields (5.5-7.1 kG), but significant macroscopic velocities of different signs, at the level of 50-60 km s⁻¹.*

Conclusions. *We conclude that spectral-polarization observations of active processes on the Sun using the HST of AO KNU have the greatest value when they are carried out in the monitoring mode and with the aim of recording extremely powerful manifestations of solar activity. It was shown that magnetic fields of ~ 10⁵ G range are possible in solar flares even in the lower solar corona till heights of 10-20 Mm, which is of considerable interest for the MHD theory of concentrated fields in the solar atmosphere.*

Keywords: *solar activity, solar flares, spectral polarization analysis, local magnetic fields, the problem of extremely strong magnetic fields.*

Автор заявляє про відсутність конфлікту інтересів. Спонсори не брали участі в розробленні дослідження; у зборі, аналізі чи інтерпретації даних; у написанні рукопису; в рішенні про публікацію результатів.

The author declares no conflicts of interest. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses, or interpretation of data; in the writing of the manuscript; or in the decision to publish the results.