

УДК 523.985.3

Н. Кондрашова, канд. фіз.-мат. наук

Головна астрономічна обсерваторія Національної академії наук України, Київ, Україна

Присвячується пам'яті П. Р. Романчука, П. М. Полупана, К. В. Алікаєвої,
О. О. Рожило, У. М. Лейко, Е. О. Барановського

СПІЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ СОНЯЧНИХ СПАЛАХІВ В АСТРОНОМІЧНІЙ ОБСЕРВАТОРІЇ КИЇВСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ ІМЕНІ ТАРАСА ШЕВЧЕНКА І В ГОЛОВНІЙ АСТРОНОМІЧНІЙ ОБСЕРВАТОРІЇ НАЦІОНАЛЬНОЇ АКАДЕМІЇ НАУК УКРАЇНИ

Описано спільні дослідження фотосфери та хромосфери перед спалахами та під час сонячних спалахів, проведені в Астрономічній обсерваторії Київського університету імені Тараса Шевченка та в Головній астрономічній обсерваторії Національної академії наук України. Спостереження спалахово-активних областей виконано на сонячних горизонтальних телескопах ГАО НАН України АЦУ-5 Ернеста Гуртовенка у Києві, АЦУ-26 – на піку Терскол і на франко-італійському баштовому телескопі THEMIS зі спектрополяриметром на Канарських островах в Іспанії. Виявлено значні зміни спектральних ліній, що формуються у фотосфері, у зв'язку зі спалахами. Надано деякі результати моделювання фотосфери та хромосфери перед спалахами та під час спалахів різних балів, а також зроблено висновки щодо важливої ролі фотосфери у спалаховому процесі, послідовності розповсюдження спалахового збурення в нижніх шарах атмосфери Сонця.

Ключові слова: Сонце, сонячна активність, сонячні спалахи, фотосфера, хромосфера, напівемпіричні моделі.

Вступ. У 70-х рр. минулого століття життя в Астрономічній обсерваторії Київського університету вирувало. Директор обсерваторії Павло Родіонович Романчук (1972–1987) добився розширення її штату, в обсерваторію прийшло багато молодих спеціалістів. Старше покоління тепло та доброзичливо поставилося до поповнення. В обсерваторії склалася дружня, творча атмосфера. Розпочиналися нові напрями досліджень. Особливо це стосувалося вивчення Сонця та сонячної активності, її прогнозування. Якось 1975 р. Павло Родіонович викликав завідувача відділу сонячної активності – Прокопа Миколайовича Полупана – та мене, молодшого наукового співробітника, і запропонував нам нову тематику досліджень: пошуку і вивчення змін спектра Фраунгофера у зв'язку зі спалахами.

У той час спалахи вважалися суто хромосферними явищами, оскільки їхні прояви найпомітніші у хромосферних лініях. Вивчалися в основному хромосферні лінії у спектрах спалахів, а спалахи називали “хромосферними”. Вважали, що фотосфера не реагує на спалахи. Спостереження в рентгенівському, мікрохвильовому та ультрафіолетовому діапазонах спектра показали, що джерело спалахів міститься в короні, але фотосфері надавали дуже мало уваги. Тоді П. Р. Романчук спільно з В. Н. Криводубським розробили нову теорію, згідно з якою у фотосфері відбуваються фізичні процеси, що призводять до виникнення спалахів [71]. Ідея пошуку змін фізичного стану фотосфери у зв'язку зі спалахами з'явилася у Павла Родіоновича на підставі висновків цієї роботи. Такі дослідження важливі для розв'язання питання про механізм накопичення, перенесення та вивільнення енергії і прогнозування спалахів. Ми із зацікавленістю сприйняли пропозицію Павла Родіоновича. Унаслідок оброблення спектрів трьох спалахів різних балів, отриманих П. М. Полупаном на горизонтальних сонячних телескопах Астрономічної обсерваторії Київського університету і в Кримській астрофізичній обсерваторії [68] виявлено зміни форми, інтенсивностей, еквівалентних ширин і напівширин профілів декількох слабких ліній Fe I, Cr I і C I, які формуються в нижніх шарах фотосфери, відносно профілів ліній області без спалахів, що вказувало на збурення фотосфери під час спалахів [41]. Ернест Андрійович Гуртовенко схвалив цю, як він назвав, “піонерську” роботу. Пізніше він також завжди підтримував цей напрям досліджень. Слід зазначити, що Павло Родіонович постійно цікавився ходом нашої роботи. Завдяки Прокопу Миколайовичу у відділі панувала спокійна, дружня робоча атмосфера.

Спостереження на телескопі АЦУ-5 Ернеста Гуртовенка. Для надійнішого та точнішого визначення параметрів фотосферних ліній необхідними були добра просторова та спектральна здатності спектрографа. Ми з Прокопом Миколайовичем вирішили, що для подальшого дослідження було б добре проводити спостереження на сонячному горизонтальному телескопі АЦУ-5 Головної астрономічної обсерваторії НАН України. Зараз цей телескоп носить ім'я Ернеста Гуртовенка. Звернувшись до Павла Родіоновича, ми отримали його повну підтримку. Це питання він узгодив з Ернестом Андрійовичем. Відтоді розпочалася спільна робота над темою зі співробітниками Головної астрономічної обсерваторії НАН України К. В. Алікаєвою та С. І. Ганджою. Слід зазначити, що П. М. Полупан та К. В. Алікаєва вже мали досвід у вивченні спалахів.

1977 р. почалися фотографічні спостереження спалахово-активних областей Сонця на телескопі АЦУ-5. Основні характеристики телескопа: фокусна відстань головного дзеркала – 17 м, целостат і додаткове дзеркало 440 мм, діаметр зображення Сонця 160 мм, розмір дифракційної ґратки 140×150 мм, 600 штрихів/мм, дисперсія спектрографа 0,04 нм/мм, півширина інструментального контуру 2,2 пм [35]. Спектри Сонця фотографували в області довжин хвиль 490, 520, 540, 590, 610, 630, 650 нм, кожна ділянка мала ширину приблизно 10 нм. Ділянки містили фотосферні та хромосферні H_{α} , H_{β} , D Na I лінії. Вибрані фотосферні лінії заліза, хрому, титану, магнію та інших елементів мають різну інтенсивність, глибину формування та чутливість до магнітного поля. Для пошуку активних областей і спалахів ми використовували фільтрові зображення в лінії H_{α} , які фотографували на кіноплівку. Для фотографування спектрів брали спочатку платівки WP-1, а згодом високоякісні дрібнозернисті пластинки WP-3, WO-3 фірми ORWO. Фотометричну обробку вели на автоматизованому комплексі мікрофотометр МФ-4 – ЕОМ “Раздан”, при цьому враховувалася інструментальний контур спектрографа телескопа. Пізніше фотометрична обробка фотоплатівок виконувалася на мікрофотометрах АМФ2-ZX та АЦМФ-ХУ, створених у ГАО НАН України. У результаті розрахунків отримано профілі спектральних ліній. Середня помилка вимірювання центральної інтенсивності профілів ліній становить 0,5–1 % інтенсивності неперервного спектра, напівширини 1 пм, еквівалентної

ширини 2 %. Отриманий спостережний матеріал містить спектри активних областей перед, під час і після спалахів різних балів, а також спектри флокулів, факелів, плям. Фотоплатівки зберігаються у склотеці ГАО НАН України. Архів містить близько 1500 платівок.

За матеріалами спостережень на телескопі АЦУ-5 проаналізовано варіації профілів ліній у спектрах і вивчено фізичні умови в декількох активних областях на різних стадіях розвитку спалахів різних балів. 1980 р. вийшла перша спільна стаття за результатами спостережень на телескопі АЦУ-5 [6]. У цій роботі розглянуто спектри, отримані перед спалахами і під час спалахів у жовтні 1977 р. Знайдено значні відмінності параметрів профілів 14 спектральних ліній, які формуються на різних висотах фотосфери, у спектрах спалахів і незбуреної фотосфери та флокулів, що свідчило про зміни стану фотосферних шарів у зв'язку зі спалахами. У більшості випадків спектральні лінії послаблені й розширені порівняно з лініями у спектрі незбуреної фотосфери. Зміни параметрів профілів ліній перевищували похибку їхнього визначення. Зазначимо, що в роботі [62], в якій для отримання моделей верхньої фотосфери спалахів використано крила ліній Ca II, теж зроблено висновок про збурення фотосфери у процесі спалахів.

Згодом у дослідженнях почала брати участь також співробітниця відділу сонячної активності Т. І. Редюк. 1981 р. спостереження проводились у межах програми "Рік сонячного максимуму". Виявлено зміни профілів фотосферних ліній у спектрах спалахово-активних областей, зокрема, поблизу максимумів спалахів лінії послаблені й розширені. Результати роботи доповідалися на кількох міжнародних конференціях, їх надруковано, наприклад у [8, 12].

Т. І. Редюк почала вивчати фотосферні рухи та знайшла зміни променевої швидкості у фотосфері перед спалахами і під час спалахів [69, 70]. Вона виявила тенденцію руху фотосферної речовини вгору перед спалахами та переважання низхідних потоків на стадії їхнього загасання. Вивчення тонкої структури фотосферних ліній показало, що спалахи значно впливають на їхню асиметрію [36]. Свою увагу на спостереженнях магнітного поля на телескопі АЦУ-5 за допомогою поляризаційної мозаїки зосередив С. І. Ганджа. За вимірюваннями у п'яти спалахах різних балів установлено, що поблизу їхнього максимуму напруженість магнітного поля збільшувалася, а у стадії загасання зменшувалася. Її величина в цілому не перевищувала 0,05 Тл [11]. У дослідженнях фотосфери під час спалахів брали участь також студенти Київського університету, які виконували курсові та дипломні роботи, зокрема В. М. Андрук і П. П. Берцик, які нині є співробітниками ГАО НАН України. Згодом до нас приєдналася співробітниця АО КНУ К. Г. Руднікова.

П. М. Полуван доручив співробітнику відділу сонячної активності Я. В. Павленку розроблення програми для розрахунків профілів фотосферних ліній для визначення фізичних параметрів фотосфери активних утворень на основі отриманого спостережного матеріалу. Теоретичні профілі ліній розраховувались у наближенні локальної термодинамічної рівноваги. Їх порівнювали зі спостережуваними до найкращого збігу. Програма дозволяла знайти відхилення температури, тиску, турбулентної швидкості у фотосфері спалахів від їхніх значень для незбуреної фотосфери. У роботі [8] за допомогою цієї програми зроблено перші оцінки фізичних параметрів фотосфери під час спалахів 14 і 15 травня 1981 р., які показали, що в їхньому максимумі температура фотосфери підвищувалася на 400 К, тиск зростав на 15 %, швидкості збільшувалися на 20–50 %.

Зміни фраунгоферового спектра та фізичний стан фотосфери перед спалахами вивчено в роботах [9, 10, 37, 70]. Розглянуто 9 спектральних фотосферних ліній у 50 активних областях (перед спалахами) та у 30 спокійних флокулах (без спалахів). Аналіз поведінки фраунгоферових ліній показав, що вже за 5–10 год до спалахів лінії зазнають значних змін. Слабкі лінії, що формуються у глибоких шарах фотосфери, підсилені та розширені. Їхні бісектори зміщені відносно центра ліній у короткохвильову сторону спектра. Лінії, що формуються в середній і верхній фотосфері, за декілька годин до спалахів були послаблені й розширені. Менш ніж за годину до спалахів усі лінії стають ширшими. Установлено, що перед спалахами у фотосфері переважають висхідні потоки речовини зі швидкістю 1–2 км/с.

Для моделювання фотосфери вибрано малочутливі до магнітного поля слабкі лінії. Виявлено, що за 10 год до спалахів лінії формуються у прогрітих на 100–150 К шарах із густиною, підвищеною на 5–20 %, швидкість досягає 6–7 км/с. Безпосередньо перед спалахами відбуваються різкіші зміни, коливання всіх параметрів середовища. Температура може підвищуватися на 300 К, тиск на 25 % [10].

Детально досліджено двострічковий спалах бала 2N/M2 3 червня 1979 р. Спектри отримано для усіх стадій його розвитку. Виявлено значні зміни профілів фотосферних ліній за 30 хвилин перед спалахом, причому найбільшу реакцію на предспалахову ситуацію також показали лінії, що формуються в більш низьких шарах фотосфери, на висотах нижче 200 км. На усіх стадіях спалаху спектральні лінії були переважно послаблені та розширені [42]. Вивчення рухів у фотосфері та хромосфері цього спалаху показало, що в його головній фазі у хромосфері існували висхідні потоки, що може пояснюватися тривалим помірним випаровуванням [43]. Найбільша зміна променевої швидкості на 25 км/с спостерігалася через декілька хвилин після другого H_{α} -максимуму. У фотосфері на всіх стадіях розвитку спалаху відбувався підйом речовини зі швидкістю 1–4 км/с. Напівемпіричні моделі фотосфери за 30 хв перед спалахом і в початковій фазі цього спалаху побудовано в роботі [27]. Моделі показують підвищення температури та газового тиску у верхніх шарах фотосфери вже перед спалахом, що збільшується на початковій стадії.

У роботі [3] виконано розрахунки напівемпіричних моделей хромосфери та фотосфери під час потужного двострічкового спалаху бала 3B 16 травня 1981 р. Використано хромосферні лінії H_{α} та H_{β} . Розрахунки виконувалися за програмою Е. О. Барановського шляхом спільного розв'язування рівнянь перенесення випромінювання і стаціонарності для атома водню з дев'ятьма рівнями і континуумом. У процесі обчислення іонізації водню у верхній хромосфері враховувався вплив потоку рентгенівського випромінювання і пучка швидких електронів. Величини потоків обрано з міркувань збереження енергетичного балансу [17]. Установлено, що температура в області максимальної інтенсивності ліній H_{α} та H_{β} була на 500–1100 К вище її значень для незбуреної атмосфери. У початковій фазі існували висхідні потоки зі швидкістю до 30 км/с, а в максимумі та у стадії загасання хромосферна речовина рухалася вниз зі швидкістю 5–10 км/с. Для пояснення змін інтенсивності у крилах ліній потрібно існування нагрітих тонких шарів у верхній фотосфері.

Отримано напівемпіричні моделі фотосфери активного комплексу Ms Math 16025+16030 для різних моментів у період розвитку гомологічних спалахів [2]. Розрахунки виконувалися за програмою Е. О. Барановського. Програма

дозволяє розраховувати напруженість магнітного поля. Особливістю моделей є немонотонний хід температури та густини, неоднорідні шари. Перед спалахами шар у верхній фотосфері прогрітий на 1000–1500 К, а нижній, який розміщений у глибині фотосфери, охолоджений. У головній фазі спалахів відбувалося охолодження, зміщення на 100–200 км верхнього шару у глибину та поступове прогрівання нижніх шарів. У більш потужних спалахах прогрівання було більшим і проникало глибше у фотосферу. Спочатку вузька область зниженої густини поступово охоплювала середні та нижні шари фотосфери. Напруженість магнітного поля поступово зростала протягом спалахів від 0,04 до 0,11 Тл. Для пояснення отриманих даних у роботі зроблено припущення про існування хвильового процесу, який поширюється зверху глибоко фотосфери. Більше прогрівання фотосфери у спалахах із більшими рентгенівськими балами може бути пов'язане з більшими потоками прискорених частинок [65].

Детально вивчено відмінності поведінки фотосферних ліній і термодинамічних умов у фотосфері у слабкому спалаху бала Sf 24 травня 1979 р. у його головній фазі та у спокійному флокулі. У роботі [38] визначено зсуви у спектрах і параметри 16 фотосферних ліній, що формуються на різних висотах фотосфери. Знайдено значні відмінності всіх параметрів ліній у спектрах спалаху та флокулу. У перший момент спостережень, через 4 хв після максимуму спалаху, найбільші зміни спостерігалися в лініях, що формуються у верхніх шарах фотосфери. У верхніх шарах спостерігалися також низхідні потоки з найбільшою швидкістю. Через 12 хв найбільші зміни відбувалися вже в лініях, що формуються в середніх і нижніх шарах, і швидкість у них була найбільшою. З аналізу поля швидкостей, отриманих за зсувами 34 ліній, знайдено, що в головній фазі спалаху на всіх рівнях фотосфери та у хромосфері існували низхідні потоки [39]. Цікаво, що найбільша швидкість опускання речовини спостерігалася в тонкому шарі середньої фотосфери через 16 хв після максимуму спалаху. Можливо, це пояснюється проходженням хвилі від джерела спалаху. Виявлено коливання променевої швидкості з періодом 5 хв, амплітуда якого підвищувалася протягом спалаху.

Побудовано неоднорідні напівемпіричні моделі спалаху та флокулу [19]. Вони склалися з трьох компонентів: магнітної силової трубки з магнітним полем 0,15 Тл, гранули та міжгранульного проміжку. Розрахунки моделей вели за програмою Е. О. Барановського. Як вихідну модель незбуреної фотосфери взято гідродинамічну модель грануляції, люб'язно надану нам О. С. Гадуном [32]. У результаті аналізу даних, отриманих у цих роботах, дійшли висновку про те, що спалахове збурення поступово розповсюджувалося з верхніх шарів у нижні, мало хвильовий характер та охоплювало всю фотосферу до найнижчих її шарів. Це узгоджувалося з даними спостережень у рентгенівському й ультрафіолетовому діапазонах, які показали, що спалахи можуть виникати в результаті магнітних Perez'єднань у короні. За результатами серії робіт на цю тему М. М. Пасечник захистила кандидатську дисертацію.

Пізніше в роботі [7] отримано напівемпіричні моделі для різних стадій двострічкового спалаху бала 1B/C4 7 жовтня 1979 р. Для моделювання використано програму SIR (Stokes Inversions based on Response functions) [72], люб'язно надану нам співробітниками Інституту астрофізики на Канарських островах. У ній розв'язується рівняння перенесення випромінювання за умовою локальної термодинамічної рівноваги та гідростатичної рівноваги. Програма дозволяє розраховувати одно- та двокомпонентні моделі фотосфери. За її допомогою можна отримати розподіли температури, газового тиску, променевої швидкості, мікро- та макротурбулентної швидкості й напруженості магнітного поля з висотою фотосфери і кут нахилу й азимут вектора магнітного поля. У цій роботі для моделювання використано декілька ліній із малим фактором Ланде та розраховано однокомпонентні моделі. Вони показують, що на стадії попереднього нагрівання збурення у вигляді холодних шарів розповсюджувалося з глибоких шарів фотосфери. В імпульсній фазі та в максимумі спалаху зсув униз області зниженої температури, прогрівання верхніх шарів фотосфери та низхідні потоки у хромосфері свідчать про те, що збурення розповсюджувалося з верхніх шарів атмосфери Сонця в нижні й охоплювало найнижчі шари фотосфери. Збурення може бути викликано проходженням холодної конденсації, що супроводжувалася хвилями, з місця магнітного Perez'єднання у верхній атмосфері [31, 65, 74]. Наприкінці спалаху фотосфера все ще перебувала у збуреному стані.

Спостереження на телескопі АЦУ-26. 1989 р. почалася підготовка до спостережень на горизонтальному сонячному телескопі АЦУ-26 ГАО НАН України, установленому на піку Терскол у Кабардино-Балкарії, Приельбрусся, на Високогірній спостережній базі "Терскол" (висота над рівнем моря 3100 м), нині в обсерваторії Міжнародного центру астрономічних і медико-екологічних досліджень (МЦ АМЕД) [4]. Вибір телескопа був обумовлений тим, що він розташований у високогірній, екологічно чистій місцевості з хорошим астрокліматом, має високу просторову та спектральну роздільну здатність. Основні характеристики телескопа: діаметр головного дзеркала 65 см, фокусна відстань 17,5 м, діаметри дзеркал спектрографа 30 см, фокусні відстані 8 м, дифракційна ґратка 250×200 мм, 600 штрихів/мм. Спектрограф телескопа має п'ять камер, що дозволяє одночасно фотографувати спектр Сонця у п'яти ділянках. В установленні целостатних дзеркал узяв участь П. М. Полупан. Усе було зроблено дуже ретельно, що дозволило згодом отримувати якісні спектри та зображення. Улітку 1989 р. ми з К. В. Алікаєвою займалися в Терсколі підготовкою камерних дзеркал (юстируванням, фокусуванням), підбором спектральних ділянок і проявника для майбутніх спостережень. У підготовці до спостережень брав участь і В. О. Данилевський.

1990 р. ми в АО КНУ отримали спільний із ГАО НАН України грант для досліджень спалахово-активних областей, що дозволило організувати експедицію для спостережень у Терсколі. Вона відбулася влітку 1990 р. за сприяння директора АО КНУ В. В. Тельнюка-Адамчука. В експедиції також взяли участь співробітники АО КНУ В. О. Данилевський, О. О. Рожило та С. С. Єрьомін. Вони встановили оптичну установку для інтерференційно-поляризаційного фільтра H_{α} -фільтра Халле, який використовувався для пошуку активних областей і спалахів на Сонці. Фільтрограми в лінії H_{α} і точний час експозиції записували на відеомагнітофон одночасно з фотографуванням спектрів [28]. Ділянки спектра в різних довжинах хвиль 490, 520, 540, 590, 610, 620, 630, 650 нм мали довжину 10 нм.

У липні 1990 р. проведено перші спостереження. Протягом літа 1990 р. у спостереженнях брали участь К. В. Алікаєва, Т. І. Редюк, К. Г. Руднікова, Н. М. Кондрашова, В. О. Данилевський, О. О. Рожило та С. С. Єрьомін. 1991 р. також планували спостереження на телескопі АЦУ-26, але через політичну ситуацію у країні вони не вдалися.

Спостережні матеріали, отримані на телескопі АЦУ-26, використано в багатьох роботах, наприклад у [5, 20, 21, 25]. Оброблення спектрів проводили співробітники ГАО НАН України В. Г. Парусімов і В. Л. Костюченко на двокоординатному мікрофотометрі, створеному В. Г. Парусімовим [66].

У роботах [5, 25] вивчено зміни стану фотосфери та хромосфери протягом слабкого спалаху бала Sf/C5 2 серпня 1990 р. Завдяки хорошій просторовій здатності телескопа автори змогли виділити структуру спалаху на $H\alpha$ -зображеннях. Визначено швидкості в різних частинах $H\alpha$ -петлі. В імпульсній фазі спалаху зареєстровано підйом хромосферної речовини зі швидкістю до 10 км/с у верхівці петлі, причому швидкість зменшувалася протягом хвилини. У максимумі спалаху потік змінив напрямок. У нижній частині петлі на всіх стадіях спалаху у хромосфері та фотосфері спостерігалися низхідні потоки. Автори пов'язують підйом петлі вгору в імпульсній фазі з процесами у фотосфері перед початком спалаху. За програмою Е. О. Барановського [18] отримано напівемпіричні фотосферні моделі для імпульсної фази цього спалаху. Моделі показують неоднорідності температури та густини. Температура на 1000 К перевищує її величину в моделі спокійного флокулу та із часом зменшується. Знайдено, що спалахове збурення розповсюджується з верхніх шарів сонячної атмосфери й охоплює найнижчі шари фотосфери. Такий же висновок отримано в роботі [2], але швидкість розповсюдження збурення у спалаху 2 серпня 1990 р. виявилася у декілька разів більша. Характер моделей і низхідні потоки в підніжжі петлі автори пояснюють можливим проходженням холодної конденсації або хвиль із місця Perez'єднання у верхній атмосфері Сонця.

У роботі [26] досліджено променеві швидкості у хромосферних і фотосферних шарах $H\alpha$ -петель спалаху бала 1b/M2.2 3 вересня 1990 р. Знайдено квазіперіодичні варіації інтенсивності та швидкості з періодами близько 3 хв на вершинах петель і близько 1–2 хв у їхніх основах, причому в основах петель інтенсивності і швидкості були набагато більшими. У максимумах інтенсивності у фотосфері спостерігалися низхідні потоки. За результатами досліджень на основі спостережень на телескопі АЦУ-26 С. М. Чорногор захистила кандидатську дисертацію.

У роботах [20, 21, 40] вивчено фізичні умови у фотосфері та хромосфері двострічкового спалаху бала 2N/C9 4 вересня 1990 р. на усіх стадіях його розвитку. Спектри спалаху та його зображення в лінії $H\alpha$ отримали Т. І. Редюк, В. О. Данилевський та О. О. Рожило. Спалах супроводжувався хромосферним викидом. Найбільші швидкості на фотосферних рівнях спостерігали в головній фазі спалаху. Швидкість у фотосфері змінювалася від –4 до 2 км/с. Часові зміни швидкості були різними у двох вузлах спалаху. На основі даних спостережень у лінії $H\alpha$ за програмою Е. О. Барановського отримано дво- і трикомпонентні моделі хромосфери для різних перерізів спектрів спалаху та викиду. Для пояснення емісії у крилах лінії введено компоненти з фактором заповнення від 2 до 15 %, в яких температура нижньої хромосфери збільшена на 1000–3500 К відносно її величини для незбуреної атмосфери. Швидкість у верхній хромосфері коливалася від –100 до –15 км/с, у нижній була не більше 40 км/с. Виявлено зміни напрямку руху з глибиною атмосфери, що свідчить про вихровий характер рухів.

Спільні дослідження на основі спостережень на сонячному горизонтальному телескопі Астрономічної обсерваторії Київського національного університету імені Тараса Шевченка. На основі спостережень В. Г. Лозицького на ешельному спектрографі з аналізатором кругової поляризації сонячного горизонтального телескопа АО КНУ вивчено фізичний стан фотосфери в початковій і головній фазах спалаху бала 2N/M2 18 липня 2000 р. Характеристики цього телескопа і спектрографа наведено у роботі [49]. За допомогою програми SIR із використанням профілів Стокса I та V семи фотосферних ліній заліза та хрому отримано напівемпіричні двокомпонентні моделі спалаху. Вони складаються з магнітного та немагнітного компонентів. Температура в магнітному компоненті моделей мала немонотонний хід із висотою. У середній і верхній фотосферах вона значно підвищена. Протягом спалаху температура в нижніх шарах збільшилася на 500 К. Напруженість магнітного поля в магнітному компоненті збільшилася на 0,05 Тл у нижній та на 0,08–0,1 Тл у верхній фотосфері, а її висотний градієнт зменшився у півтора рази. У початковій фазі спалаху в нижній фотосфері модель показує висхідні потоки, а у верхній фотосфері – низхідні [15, 16].

Спостереження на франко-італійському телескопі THEMIS. Спільні дослідження сонячних спалахів у ГАО НАНУ та АО КНУ продовжувалися з використанням спектрополяриметричного спостережного матеріалу, отриманого 2009 р. співробітницею Інституту астрофізики на Канарських островах О. В. Хоменко та в 2012–2014 рр. О. С. Андрієць на франко-італійському сонячному телескопі THEMIS, розташованому на Канарських островах в обсерваторії Тейде в Іспанії ($D=90$ см). Ми з М. М. Пасечник супроводжували спостереження з метою пошуку спалахів і вибору відповідних місць на Сонці. Постійно простежували в інтернеті $H\alpha$ -зображення Сонця та рентгенівські дані, отримані на супутниках GOES.

У дослідженнях спалахів за матеріалами спостережень брали участь співробітники АО КНУ О. С. Андрієць (Молочко), У. М. Лейко, О. Б. Осика та співробітники ГАО НАНУ М. М. Пасечник, С. М. Чорногор, Н. М. Кондрашова. Для дослідження термодинамічних і магнітних параметрів сонячної плазми використовують профілі Стокса I , Q , U , V фотосферних ліній у декількох ділянках спектра та профілі хромосферної лінії $H\alpha$.

На основі спостережень на телескопі THEMIS за допомогою програми SIR отримано напівемпіричні двокомпонентні фотосферні моделі двох флокулів за 1 год 50 хв перед спалахом рентгенівського бала C1 24 травня 2012 р. Вони складаються з магнітного та немагнітного компонентів. У магнітному компоненті моделей є шари з підвищеною та зниженою температурами. Напруженість магнітного поля змінювалася від 0,2 Тл у нижніх до 0,13 Тл у верхніх шарах фотосфери. У нижній і середній фотосферах існували висхідні потоки зі швидкістю 2 км/с, у верхній швидкість досягала 5–6 км/с. Виявлено розбіжності фізичного стану фотосфери у різних місцях активної області [13].

За даними спектрополяриметричних спостережень на телескопі THEMIS вивчено зміни фізичного стану фотосфери під час фази загасання слабкого сонячного спалаху бала SF/B6.8 28 травня 2012 р. в активній області NOAA 11490. За допомогою програми SIR отримано напівемпіричні фотосферні моделі. Кожна модель має двокомпонентну структуру: магнітну силову трубку з магнітним потоком і немагнітне оточення. Моделі показують підвищення температури після максимуму спалаху. Напруженість магнітного поля зменшується з 0,12–0,18 Тл ($\log \tau = 0$) до 0,055–0,11 Тл ($\log \tau = -3$). Низхідні потоки існували у фазі загасання спалаху [14].

За даними спостережень активної області NOAA 11024 на телескопі THEMIS вивчено варіації променевої швидкості у хромосфері перед, під час і після сонячного мікроспалаху 4 липня 2009 р. бала B3.1. Просторова роздільна здатність становила приблизно 1 с дуги. Ділянка спектра містила лінію $H\alpha$. Серія тривала 21 хв. Інтервал часу між спектрами становив 2,84 с. Виявлено значні часові зміни променевої швидкості у хромосфері. Перед

спалахом швидкість висхідних потоків у верхній хромосфері змінювалася від 25 до 0 км/с. Відбувалося коливання швидкості з періодом 3–5 хв з амплітудою 4–5 км/с. За 2 хв до і протягом спалаху існували низхідні потоки з максимальною швидкістю 5 км/с. На зовнішньому краю досліджуваної області за 14 хв до спалаху виявлено хромосферні подвійні потоки зі швидкістю близько 20 км/с [52, 53]. У цьому місці профілі Стокса V фотосферних ліній 630,15 нм і 630,25 нм були аномальними.

Обговорення. Аналіз наших спостережень фраунгоферового спектра спалахів показав, що на усіх стадіях їхнього розвитку низькотемпературні шари сонячної атмосфери охоплені збуренням. Спостережні й теоретичні дані вказують, що спалахові процеси зачіпають усю атмосферу Сонця від корони до найнижчих фотосферних шарів. Вихід нових магнітних потоків і розповсюдження хвиль із підфотосферних шарів, горизонтальні фотосферні рухи створюють умови для магнітних перез'єднань у верхній атмосфері Сонця та виникнення спалахів. Уже за декілька годин перед спалахами нами виявлено значні зміни профілів фраунгоферових ліній, особливо ліній, що формуються в нижніх шарах фотосфери. Це свідчить про зміни фізичного стану фотосфери. У багатьох роботах знайдено, що у хромосфері та фотосфері перед спалахами існують висхідні потоки. За декілька хвилин перед спалахами відбуваються різкі зміни параметрів профілів фотосферних ліній, які можуть бути обумовлені змінами термодинамічних умов унаслідок виходу нових магнітних потоків. Напівемпіричні моделі на передспалаховій стадії показують прогрівання верхніх і середніх та охолодження нижніх шарів фотосфери. Збурення розповсюджуються з нижніх, можливо підфотосферних, шарів фотосфери вгору. У нижніх шарах атмосфери можуть відбуватися маломасштабні перез'єднання магнітних силових ліній, які передують великомасштабному магнітному перез'єднанню в короні, наприклад, як бачимо з [64]. Про можливість магнітних перез'єднань у фотосфері і хромосфері повідомлено в роботах [24, 30, 54, 73]. У результаті вивчення спалаху 28 жовтня 2003 р. бала X17.2/4В автори роботи [57] дійшли висновку, що в області сейсмічного джерела виконувалися необхідні умови для перез'єднання магнітних силових ліній на фотосферному рівні. У роботі [29] установлено, що перед спалахом бала M1.1 26 січня 2015 р. магнітні перез'єднання відбувалися одночасно в нульовій точці в короні і в нижніх шарах сонячної атмосфери.

У початковій фазі спалахів і в максимумі згідно з нашими даними відбувається прогрівання верхніх шарів і розповсюдження спалахового збурення з верхніх у нижні шари фотосфери, поступове прогрівання нижніх шарів, що в більшості випадків супроводжується опусканням хромосферної речовини. У двострічковому спалаху 3 червня 1979 р. відбувалося її піднімання, можливо, зумовлене помірним випаровуванням. Прогрівання верхніх шарів фотосфери і нижньої хромосфери в предмаксимальній фазі спалаху 19 липня 2000 р. бала M6.4/3N виявлено і в роботах [59, 60]. Напівемпіричні моделі фотосферних шарів у цих роботах побудовано шляхом розв'язання оберненої задачі нерівноважного перенесення випромінювання з використанням Тихоновських стабілізаторів. У фотосфері спостерігалися висхідні рухи зі швидкістю до 1 км/с внаслідок випаровування речовини.

В імпульсній фазі спалахів можливо охолодження верхніх шарів фотосфери внаслідок проходження холодної конденсації, як показано в теоретичних дослідженнях, наприклад у [74]. У роботах [31, 34, 65] вивчено відгук хромосфери на проходження холодної конденсації. Побудовані нами напівемпіричні моделі спалаху 7 жовтня 1979 р., очевидно, відображають такий випадок.

У максимумі і в головній фазі спалахів, як показують наші напівемпіричні моделі хромосфери і фотосфери, спалахове збурення розповсюджується з верхніх шарів сонячної атмосфери й охоплює найнижчі шари фотосфери. У більшості випадків у хромосфері спостерігаються низхідні потоки, але в деяких спалахах висхідні, що можна пояснити випаровуванням хромосфери під дією потоків тепла та прискорених частинок, що розповсюджуються з місця магнітного перез'єднання.

Напівемпіричні моделі низькотемпературних шарів спалахів у максимумі та в головній фазі розраховано також у багатьох роботах, наприклад [1, 22, 23, 33, 50, 51, 56, 60, 61, 62]. Однокомпонентні моделі, отримані в [33, 61, 62] з використанням хромосферних ліній, показують підвищення температури під час спалахів на декілька сотень градусів в області температурного мінімуму і у верхній фотосфері відносно її значень у незбуреній фотосфері. Упродовж спалаху бала 2В, що виник 3 лютого 1983 р., температура поступово зменшувалася і наприкінці спалаху опустилася до передспалахового рівня [33]. Вплив магнітного поля в цих роботах не враховувався. У дослідженні [22] побудовано напівемпіричну модель хромосфери і фотосфери спалаху бала 1В 8 червня 1989 р. Використано фотосферні лінії Fe I $\lambda\lambda$ 513,15 та 543,5 нм, Fe II $\lambda\lambda$ 429,39 та 501,84 нм, і хромосферні лінії H_{α} і H_{γ} . Розрахунки зроблено з урахуванням відхилень від локальної термодинамічної рівноваги. Модель показує, що поблизу максимуму спалаху температура у хромосфері підвищена на 4000 К, а густина на 1–1,5 порядки. У нижній фотосфері моделі температура не змінена порівняно з температурою незбуреної області, а у верхній підвищена на 2000 К. Напруженість магнітного поля збільшувалася з висотою від 89–90 мТл у верхній фотосфері до 120 мТл у хромосфері.

У напівемпіричних моделях фотосфери, у максимумі потужних спалахів 19 липня 2000 р. бала M6.4 та 5 листопада 2004 р. бала M4.1/1В, у верхній і середній фотосферах є два шари із значно підвищеною температурою (у верхній фотосфері на 2000 К) [50, 51], а також вузький пік напруженості магнітного поля (200 мТл) у верхній фотосфері. Під час головної фази спалаху 5 листопада 2004 р. вони зміщувались углиб фотосфери, напруженість магнітного поля зменшувалася до 50 мТл. У роботах [23, 56] напівемпіричні фотосферні моделі потужного спалаху бала X17.2/4В 28 жовтня 2003 р. поблизу максимуму побудовано за допомогою програми SIR із використанням сильних ліній Fe I 525,0 нм, Fe I 557,6 нм, Ca I 610,27 нм. Знайдено, що у верхній фотосфері температура підвищена на 800 К. Напруженість магнітного поля зменшувалася з висотою фотосфери від 250 мТл у нижніх до 90 мТл у верхніх шарах. У роботах [47, 48] за допомогою програми NICOLE, яка враховує відхилення від локальної термодинамічної рівноваги, побудовано напівемпіричні моделі спалахів рентгенівських балів C8.4 і M1.9. Спектрополяриметричні спостереження хромосферної лінії Ca II 854,2 нм отримано з високою роздільною здатністю на спектрополяриметри зображень CRISP на шведському 1-метровому сонячному телескопі. Установлено, що під час спалаху бала C8.4 температура підвищувалася від 6500 К в середній до 20000 К у верхній хромосфері. На висоті формування лінії існували слабкі низхідні конденсації. У максимумі спалахів спостерігалось підсилення поляризаційного сигналу. У фотосфері не знайдено істотних змін, як і в роботі [79], в якій досліджувався спалах бала C2 6 травня 2019 р. на різних стадіях розвитку. Спостереження також отримано на шведському 1-метровому

сонячному телескопі. Для визначення фізичних параметрів використано сильну лінію Fe I 617,3 нм, яка формується у верхній фотосфері, і хромосферні лінії Ca II K та Ca II 854,2 нм. Виявлено сильне прогрівання області температурного мінімуму та хромосфери. Максимальна напруженість магнітного поля протягом спалаху у хромосфері становила ~0,06 Тл. Після спалаху вона зменшилася до передспалахової величини.

Магнітні поля у фотосфері під час спалахів вивчалися ще в багатьох роботах, наприклад у [44, 45, 46, 55, 58, 59, 63, 67, 75]. У дослідженні [58] наведено докази багатокомпонентної структури магнітного поля у спалахах. Швидкі та значні зміни поздовжнього магнітного потоку перед спалахом бала X4.0 26 листопада 2000 р. в активній області NOAA 9236 зазначено в [63]. У роботах [44, 45, 67, 75, 77, 78] виявлено варіації поздовжнього магнітного поля порядку 0,010–0,045 Тл під час потужних спалахів бала X. У роботі [46] на основі спектрополяриметричних спостережень спалаху бала M3.2 17 травня 2013 р. по лінії кремнію вивчено еволюцію магнітного поля та рухів у фотосфері та знайдено сильні коливання напруженості магнітного поля. Перед спалахом напруженість магнітного поля в деяких місцях досягала 0,15 Тл. У час спалаху вона зменшувалася порівняно з передспалаховою фазою або була відсутня, а після спалаху через 30 хв конфігурація магнітного поля відновилася. Під час спалаху у фотосфері спостерігалися висхідні потоки. У роботах [55–60] наведено дані на користь сильних магнітних полів у потужних спалахах, у спалахах над сонячними плямами. У роботі [76] отримано моделі спалаху бала X2.2 6 вересня 2017 р. в активній області NOAA 12673 з використанням ліній Fe I 630,15 нм, 630,25 нм та Ca II 854,2 нм. Виявлено ділянки з напруженістю магнітного поля 0,45 Тл у фотосфері та 0,3 Тл у хромосфері. Необхідні нові спостереження на телескопах з більшою просторовою роздільною здатністю для визначення напруженості магнітного поля спалахів і структури магнітного поля.

Висновки. У результаті спостережень на сонячних телескопах АЦУ-5 Ернеста Гуртовенка в Києві, АЦУ-26 на піку Терскол у Приельбруссі, франко-італійському телескопі THEMIS на Канарських островах в Іспанії накопичено великий спектральний матеріал. Уже перші дослідження показали існування змін фраунгоферового спектра Сонця у зв'язку зі спалахами, що свідчить про зміни фізичного стану фотосфери.

Аналіз великого набору отриманих даних дозволив установити, що вже за 10 год перед спалахами термодинамічні умови в нижніх шарах фотосфери відрізняються від умов у спокійних флокулах без спалахів. Знайдено, що перед спалахами у фотосфері та хромосфері існують висхідні потоки. Збурення фотосфери на цьому етапі розвитку спалахів може бути наслідком виходу нових магнітних потоків або горизонтальних рухів.

Напівемпіричні моделі показують зміни температури та тиску у фотосфері та хромосфері під час спалахів. Моделі містять шари з підвищеною і зниженою температурами. Вивчення послідовності проявів спалаху у фотосфері свідчить про те, що спалахове збурення, викликане хвилями і частинками, розповсюджується з місця магнітних перез'єднань у верхніх шарах атмосфери Сонця в нижній й охоплює всю атмосферу Сонця, включаючи її найнижчі шари. Дані спостережень можуть бути експериментальною перевіркою існуючих і майбутніх теоретичних моделей спалахів.

Подяка. Автор дякує О. В. Хоменко за надання спектрополяриметричних даних спостережень і групі технічної підтримки телескопа THEMIS, а також всім, хто сприяв проведенню спостережень у Києві та в Терсколі.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- Abramenko V.I., Baranovsky E.A. Flare-related changes in the profiles of six photospheric spectral lines // *Solar Physics*. – 2004. – Vol. 220, Iss. 1. – P. 81–91.
- Alikaeva K.V., Baranovskij E.A., Kondrashova N.N., Redyuk T.I., Rudnikova E.G. Semiempirical models of the photosphere of a solar activity complex // *Kinematics Phys. Celest. Bodies*. – 1995. – Vol. 11. – No. 2. – P. 7–18.
- Alikaeva, K.V., Baranovskii E.A., Polupan P.N. The variations of the state of low-temperature plasma during a strong solar flare // *Kinematika i Fizika Nebesnykh Tel.* – 1986. – Vol. 2. – №4 – P. 27–33.
- Alikaeva K.V., Burlov-Vasil'ev K.A., Vasil'eva, I.E., et al. Horizontal solar telescope ATsU-26 in the Caucasus // *Kinematics Phys. Celest. Bodies*. – 1996. – Vol. 12, No. 6. – P. 54–60.
- Alikaeva K.V., Chornogor S.N. State of the chromospheric and photospheric material of a solar subflare. I. Line-of-sight velocities // *Kinematika i Fizika Nebesnykh Tel.* – 2000. – Vol. 16, No. 6. – P. 541–551.
- Alikaeva K. V., Gandzha S. I., Kondrashova N. N., Polupan P. N. Variations of the Fraunhofer spectrum of solar active regions in relation to flares // *Astrometriia i Astrofizika*. – 1980. – no. 42. – P. 3–14.
- Alikaeva K.V., Kondrashova N.N. Disturbance of the photosphere during solar two-ribbon flare // *Kinematika i Fizika Nebesnykh Tel.* – 2006. – Vol. 22, No. 3. – P. 163–172.
- Alikaeva K.V., Kondrashova N.N., Polupan P.N., Redyuk T.I. Photospheric layers of flares of May 14, 15, 1981 in AR 3106+3112 // *Publ. Debrecen Hel. Obs.* – 1983. – Vol. 5. – P. 177–184.
- Alikaeva K.V., Kondrashova N.N., Redyuk T.I., Rudnikova E.G. Lower photosphere in solar active regions prior to flares and without flares. I. The Fraunhofer spectrum // *Kinematika i Fizika Nebesnykh Tel.* – 1993. – Vol. 9. – No. 1. – P. 24–36.
- Alikaeva K.V., Kondrashova N.N., Redyuk T.I., Rudnikova E.G. Lower photosphere in solar active regions prior to flares and without flares. II. Physical conditions // *Kinematics Phys. Celest. Bodies*. – 1993. – Vol. 9. – No. 2. – P. 50–60.
- Alikaeva K.V., Polupan P.N., Gandzha S.I., Kondrashova N.N., Redyuk T.I. On photospheric magnetic fields in flare regions // *Vestnik Kiev Univ., Seria Astronomii*. – 1985. – Vol. 27. – P. 3–7.
- Alikaeva K.V., Polupan P.N., Kondrashova N.N., Redyuk T.I. Preliminary results of spectral investigations of the active regions 2030 and 2032 according to the program of the year of solar maximum // *Vestnik Kiev Univ., Seria Astronomii*. – 1983. – Vol. 25. – P. 11–15.
- Andriets E.S., Kondrashova N.N. Preflare changes in the solar photosphere observed using the THEMIS telescope // *Kinematics Phys. Celest. Bodies*. – 2014. – Vol. 30, No 1. – P. 32–39.
- Andriets E.S., Kondrashova N.N. Semiempirical photospheric models of a solar flare on May 28, 2012 // *Advances in Space Research*. – 2015. – Vol. 55, Iss. 3. – P. 871–878.
- Andriets E.S., Kondrashova N.N., Kurochka, E.V. Two-component photosphere models of a 2N/M2-class solar flare // *Kinematics Phys. Celest. Bodies*. – 2014. – Vol. 30, No 2. – P. 92–99.
- Andriets E.S., Kondrashova N.N., Kurochka E.V., Lozitsky V.G. Photosphere model of 2N/2M solar flare: July 18, 2000 // *Bull. Crimea Astrophys. Obs.* – 2012. – Vol. 108, Iss. 1. – P. 1–3.
- Baranovskij E.A. Model of the upper chromosphere: the energy balance in the region of solar flare // *Izv. Krymskoj Astrofiz. Obs.* – 1984. – Vol. 69. – P. 100–105.
- Baranovsky E.A. Semiempirical LTE modelling of solar photospheric layers. I. Theoretical background // *Contrib. Astron. Obs. Skalnaté Pleso*. – 1993. – Vol. 23. – P. 107–117.
- Baranovskij E.A., Kondrashova N.N., Pasechnik M.N. Photospheric layers of a flare and a plage. IV. Semiempirical models // *Kinematika i Fizika Nebesnykh Tel.* – 2000. – Vol. 16, No. 5. – P. 387–399.
- Baranovsky E.A., Kondrashova N.N., Pasechnik M.N., Tarashchuk V.P. Physical conditions in the chromosphere of a two-ribbon solar flare accompanied by a surge: I. // *Kinematics Phys. Celest. Bodies*. – 2013. – Vol. 29, No. 4. – P. 167–175.
- Baranovsky E.A., Kondrashova N.N., Pasechnik M.N., Tarashchuk V.P. Physical conditions in the chromosphere of a two-ribbon solar flare accompanied by a surge: II. // *Kinematics Phys. Celest. Bodies*. – 2014. – Vol. 30, No. 6. – P. 268–275.

22. Baranovskij E.A., Lozitskaya N.I., Lozitskij V.G. Magnetic fields and thermodynamic conditions in the solar flare of June 8, 1989 // *Kinematics Phys. Celest. Bodies.* – 1991. – Vol. 7, No. 3. – P. 49–54.
23. Baranovsky E.A., Lozitsky V.G., Tarashchuk V.P. Modelling of photosphere and chromosphere of two powerful flares (28 October 2003 and 1 September 1990) // *Kinematics Phys. Celest. Bodies.* – 2009. – Vol. 25, No. 5. – P. 373–384.
24. Chae J., Moon Y.-J., Park S.-Y. Observational tests of chromospheric magnetic reconnection // *J. Korean Astron. Soc.* – 2003. – Vol. 36. – P. 13–20.
25. Chornogor S.N., Alikaeva K.V. State of the chromospheric and photospheric material of the subflare. II. Semiempirical photospheric models // *Kinematika i Fizika Nebesnykh Tel.* – 2001. – Vol. 17, No. 2. – P. 113–120.
26. Chornogor S.N., Alikaeva K.V. Line-of-sight velocity field in H α -loops in a course of the bright solar flare // *Kinematika i Fizika Nebesnykh Tel.* – 2003. – Vol. 19, No. 5. – P. 417–430.
27. Chornogor S.N., Kondrashova N.N. Physical state of the photosphere at the onset phase of a two-ribbon solar flare // *Solar Phys.* – 2008. – Vol. 250. – P. 303–314.
28. Danilevsky V.O., Eremin S.S., Rozhilo O.O. Instrumental support of spectral observations of active regions on the Sun // *Vestnik Kiev Univ., Seria Astronomii.* – 1992. – № 6. – P. 96–100.
29. Devi P., Joshi B., Chandra R., et al. Development of a confined circular-cum-parallel ribbon flare and associated pre-flare activity // *Solar Phys.* – 2020. – Vol. 295, Iss. 6, article id.75.
30. Falchi A., Qiu J., Cauzzi G. Chromospheric evidence for magnetic reconnections // *Astron. and Astrophys.* – 1997. – Vol. 328, N1. – P. 371–380.
31. Fisher G. H. Dynamics of flare-driven chromospheric condensations // *Astrophys. J.* – 1989. – Vol. 346, Iss. 2. – P. 1019–1029.
32. Gadun A.S. Multidimensional hydrodynamic models of the solar atmosphere: effects of radiative transfer in a multidimensional perturbed medium // *Kinematika i Fizika Nebesnykh Tel.* – 1995. – Vol. 11. – No. 3. – P. 54–72.
33. Gan W.-Q., Fang C. Time-match semiempirical models of the chromospheric flare on 3 February, 1983 // *Solar Phys.* – 1987. – Vol. 107, № 2. – P. 311–321.
34. Gan W. Q., Rieger E., Fang C. Semiempirical flare models with chromospheric condensation // *Astrophys. J.* – 1993. – Vol. 416, N2. – P. 886–892.
35. Gurtovenko E.A. Solar physics at the Main Astronomical Observatory of the Ukrainian Academy of Sciences // *Solar Phys.* – 1968. – Vol. 4, N 1. – P. 108–113.
36. Kondrashova N.N. Asymmetry of Fraunhofer lines from observations made during flares // *Vestnik. Kiev. Univ. Astron.* – 1987. – No. 29. – P. 27–33.
37. Kondrashova N.N. Pre-flare changes in the Fraunhofer lines // *Kinematics Phys. Celest. Bodies.* – 1995. – Vol. 11, No. 2. – P. 33–39.
38. Kondrashova N.N., Pasechnik M.N. Photospheric layers of flares and plages. I. Profiles, asymmetry, and shifts of Fraunhofer lines // *Kinematics Phys. Celest. Bodies.* – 1997. – Vol. 13, No. 4. – P. 52–63.
39. Kondrashova N.N., Pasechnik M.N. Photospheric layers of a flare and a plage. III. The velocity field // *Kinematics Phys. Celest. Bodies.* – 1999. – Vol. 15, No. 4. – P. 237–242.
40. Kondrashova N.N., Pasechnik M.N. Radial velocities of the photospheric matter in a solar flare with matter ejection // *Kinematics Phys. Celest. Bodies.* – 2010. – Vol. 26, No. 1. – P. 26–35.
41. Kondrashova N.N., Polupan P.N. On the profiles of weak absorption lines under flares // *Vestnik Kiev. Univ., Seriya Astronomii.* – 1977. – Vol. 19. – P. 14–19.
42. Kondrashova N.N., Rudnikova K.G. The spectral study of a two-ribbon solar flare. I. Profiles and asymmetry of lines // *Kinematika i Fizika Nebesnykh Tel.* – 2003. – Vol. 19, No. 2. – P. 97–106.
43. Kondrashova N.N., Rudnikova K.G., Pasechnik M.N. Motions of chromospheric and photospheric material in a two-ribbon solar flare. // *Kinematika i Fizika Nebesnykh Tel.* – 2001. – Vol. 17, No. 6. – P. 485–495.
44. Kosovichev A.G., Zharkova V.V. Variations of photospheric magnetic field associated with flares and CMEs. // *Solar Phys.* – 1999. – Vol. 190, N 1/2. – P. 459–466.
45. Kosovichev A.G., Zharkova V.V. Magnetic energy release and transients in the solar flare of 2000 July 14 // *Astrophys. J.* – 2001. – Vol. 550, Iss. 1. – P. L105–L108.
46. Kuckein C., Collados M., Manso Sainz R. Magnetic and dynamical photospheric disturbances observed during an M3.2 solar flare // *Astrophys. J. Letters.* – 2015. – Vol. 799, Iss. 2, 5 pp.
47. Kuridze D., Henriques V., Mathioudakis M., et al. Spectroscopic inversions of the Ca II 8542 Å line in a C-class solar flare // *Astrophys. J.* – 2017. – Vol. 846, Iss. 1, 9 pp.
48. Kuridze D., Henriques V. M. J., Mathioudakis M., L. et al. Spectropolarimetric inversions of the Ca II 8542Å line in an M-class solar flare // *Astrophys. J.* – 2018. – Vol. 860, Iss. 1, 10 pp.
49. Kurochka E.V., Kurochka L.N., Lozitskij V.G., et al. Horizontal solar telescope of the Kiev University Astronomical Observatory // *Vestnik Kiev. Univ., Seriya Astronomii.* – 1980. – Vol. 22. – P. 48–56.
50. Kurochka E.V., Lozitsky V.G. Magnetic fields and thermodynamical conditions in the M6.4/3N solar flare on July 19, 2000 // *Kinematics Phys. Celest. Bodies, Suppl.* – 2005, № 5. – P. 143–145.
51. Kurochka E.V., Lozitsky V.G., Osyka O.B. Temporal changes of physical conditions in photospheric layers of a solar flare // *Kinematics Phys. Celest. Bodies.* – 2008. – Vol. 24, No. 4. – P. 215–222.
52. Leiko U.M., Kondrashova N.N. The chromospheric line-of-sight velocity variations in a solar microflare // *Advances in Space Research.* – 2015. – Vol. 55, N 3. – P. 886–890.
53. Leiko U.M., Kondrashova N.N. Dual chromospheric flows in the vicinity of a solar pore // *Kinematics Phys. Celest. Bodies.* – 2017. – Vol. 33, No. 3. – P. 111–121.
54. Litvinenko Yu.E. Photospheric magnetic reconnection and canceling magnetic features on the Sun // *Astrophys. J.* – 1999. – Vol. 515, Iss. 1. – P. 435–440.
55. Lozitsky V.G., Baranovsky E.A., Lozitska N.I., Leiko U.M. Observations of magnetic field evolution in a solar flare // *Solar Phys.* – 2000. – Vol. 191. – P. 171–183.
56. Lozitsky V.G., Baranovsky E.A., Lozitska N.I., Tarashchuk V.P. Profiles of spectral lines, magnetic fields, and thermodynamical conditions in the X17.2/4B solar flare of 2003 October 28 // *Monthly Notices Royal Astronomical Society.* – 2018. – Vol. 477, Iss. 2. – P. 2796–2803.
57. Lozitsky V.G., Baranovsky E.A., Lozitska N.I., Tarashchuk V.P. Evidences for strong mixed-polarity magnetic fields in area of a seismic source associated with large proton solar flare // *Odessa Astron. Publications.* – 2019. – Vol. 32. – P. 125–129.
58. Lozitsky V.G., Staude J. Observational evidences for multi-component magnetic field structure in solar flares // *Journal of Astrophysics and Astronomy.* – 2009. – Vol. 29. – P. 387–404.
59. Lozitsky V., Stodilka M. Magnetic fields and thermodynamic conditions in the pre-peak phase of M6.4/3N solar flare // *Bulletin of Taras Shevchenko National University of Kyiv.* – 2019. – № 59. – P. 22–33.
60. Lozitsky V.G., Stodilka M.I. Comparison of physical conditions in two phases of the solar flare of July 19, 2000 of M6.4/3N class // *Astrophysics and Space Science.* – 2021. – Vol. 366, Iss. 3, article id.3
61. Machado M. E., Avrett E. H., Vernazza J. E., Noyes R. W. Semiempirical models of chromospheric flare regions // *Astrophys. J.* – 1980. – Vol.242, Iss. 2. – P. 336–351.
62. Machado M.E., Linsky J.L. Flare model chromospheres and photospheres // *Solar Phys.* – 1975. – Vol. 42, Iss. 2. – P. 395–420.
63. Meunier N., Kosovichev A. Fast photospheric flows and magnetic fields in a flaring active region // *Astron. and Astrophys.* – 2003. – Vol. 412. – P. 541–553.
64. Moon Y.-J., Chae J., Choe G.S., et al. Low atmosphere reconnections associated with an eruptive solar flare // *J. Korean Astron. Soc.* – 2004. – Vol. 37, No. 1. – P. 41–53.
65. Nagai F., Emslie A.G. Gas dynamics in the impulsive phase of solar flares // *Astrophys. J.* – 1984. – Vol. 279, Iss. 2. – P. 896–908.
66. Parusimov V.G. Automatic digital two-coordinate microphotometer for input of photographic images into computer // *Astrometriia i Astrofizika.* – 1981. – No. 45. – P. 86–99.
67. Petrie G.J.D., Sudol J.J. Abrupt longitudinal magnetic field changes in flaring active regions // *Astrophys. J.* – 2010. – Vol. 724, Iss. 2. – P. 1218–1237.
68. Polupan P.N. Solar installation // *Publ. Kiev. astron. observ.* – 1962. – No 10. – P. 59–64.
69. Redyuk T.I. Radial velocities at the photospheric level in active regions with flares // *Vestnik Kiev Univ., Seria Astronomii.* – 1983. – № 25. – P. 26–31.
70. Redyuk T.I. Motion of matter at the photospheric level in flare-active regions // *Vestnik Kiev Univ., Seria Astronomii.* – 1990. – № 32. – P. 28–35.
71. Romanchuk P.R., Kryvodubskiy V.N. Mechanism of occurrence of chromospheric flares // *AO KHU.* – Yzd. Kyev. un-ta. – 1974. – P. 1–17.
72. Ruiz Cobo B., del Toro Iniesta J.C. Inversion of Stokes profiles // *Astrophys. J.* – 1992. – Vol. 398. – P. 375–385.
73. Sharykin I.N., Sadykov V.M., Kosovichev A.G., et al. Flare energy release in the lower solar atmosphere near the magnetic field polarity inversion line // *Astrophys. J.* – 2017. – Vol. 840, Iss. 2, 13 pp.
74. Somov B.V., Syrovatskii S.I., Spector A.R. Hydrodynamic response of the solar chromosphere to an elementary flare burst. I. Heating by accelerated electrons // *Solar Phys.* – 1981. – Vol. 73, Iss. 1. – P. 145–155.
75. Sudol J.J., Harvey J.W. Longitudinal magnetic field changes accompanying solar flares // *Astrophys. J.* – 2005. – Vol. 635, Iss. 1. – P. 647–658.

76. Vissers G.J.M., Danilovic S., de la Cruz Rodriguez J., et al. Non-LTE inversions of a confined X2.2 flare. I. The vector magnetic field in the photosphere and chromosphere // *Astron. and Astrophys.* – 2021. – Vol. 645, 15 pp.
77. Wang S., Liu C., Liu R., et al. Response of the photospheric magnetic field to the X2.2 flare on 2011 February 15 // *Astrophys. J. Letters.* – 2012. – Vol. 745, Iss. 2., article id. L17, 5 pp.
78. Wang J., Zhao M., Zhou G. Magnetic changes in the course of the X7.1 solar flare on 2005 January 20 // *Astrophys. J.* – 2009. – Vol. 690, Iss. 1. – P. 862–874.
79. Yadav R., Díaz Baso C.J., de la Cruz Rodríguez J., et al. Stratification of physical parameters in a C-class solar flare using multiline observations // *Astron. and Astrophys.* – 2021. – Vol. 649, id.A106, 13 pp.

Надійшла до редколегії 15.07.2021

N. Kondrashova, PhD

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

**JOINT STUDIES OF SOLAR FLARES AT THE ASTRONOMICAL OBSERVATORY
OF TARAS SHEVCHENKO NATIONAL UNIVERSITY OF KYIV AND THE MAIN ASTRONOMICAL
OBSERVATORY OF THE ACADEMY OF SCIENCES OF UKRAINE**

Joint studies of changes in the photosphere and chromosphere before and during solar flares at the Astronomical Observatory of Taras Shevchenko Kyiv University and the Main Astronomical Observatory of the National Academy of Sciences of Ukraine are described. Observations of flaring-active regions were performed at solar horizontal telescopes of the GAO NASU Ernest Gurtovenko's ATsU-5 in Kyiv, ACU-26 on the Terskol peak and at the French-Italian solar tower telescope THEMIS with the spectropolarimeter in the Canary Islands in Spain. Significant variations in the spectral lines formed in the photosphere due to flares have been detected. Some results of modeling of the photosphere and chromosphere before and during flares of different classes are given. Conclusions are made regarding the important role of the photosphere in the flare process, the sequence of propagation of flare perturbation in the lower layers of the solar atmosphere.

Key words: Sun, solar flaring-active regions, solar flares, photosphere, chromosphere, semiempirical models.