

doi: <https://doi.org/10.15407/kfnt2024.05.040>

УДК 523.985.3

М. М. Пасечник

Головна астрономічна обсерваторія Національної академії наук України
вул. Академіка Заболотного 27, Київ, Україна, 03143
rita@mao.kiev.ua

Спектральне дослідження ділянки активної області з бомбою Еллермана та H⁻-викидами. Хромосфера. Система аркових волокон

Представлено результати аналізу спектральних спостережень в лінії H⁻ ділянки активної області NOAA 11024, яка перебувала в основній фазі розвитку — активність її різко зростала. Досліджувана ділянка (її довжина 10 Мм) була розташована в області появи нового змісподібного магнітного потоку. На ній сформувалася система аркових волокон (СAB), під якою виникла і розвивалася бомба Еллермана (БЕ), і на відстані близько 7.2 Мм від БЕ утворилася пора. Ми вивчаємо еволюцію СAB і досліджуємо утворення і розвиток усіх H⁻-викидів, які сформувалися в її магнітних петлях під час наших спостережень. Спектральні дані з високою просторовою ($\sim 1''$) і часовою (близько 3 с) роздільною здатністю було отримано на франко-італійському сонячному телескопі THEMIS (о. Тенеріфе, Іспанія) 4 липня 2009 року. Час спостережень становив 20 хв ($9^h 52^m \dots 10^h 11^m$ UT). Ми використали спектральну ділянку, яка містить центральну частину хромосферної лінії H⁻. На всіх спектрах H⁻-викиди (сержі) видно у поглинанні як в довгохвильовому, так і в короткохвильовому крилі лінії. Досліджено зміни форми I-профілів Стокса — вони були дуже різноманітними і значно відрізнялися від профілю для незбуреної хромосфери. Залежності від того, догори чи донизу рухався викид, компонент профілю, що відповідав йому, проектувався на синє чи червоне крило лінії. Під кінець спостережень з'явилися дуже розширені і двопелюсткові профілі, вказуючи на те, що поруч рухалися як низхідні, так і висхідні потоки плазми. Виявлено, що сержі можуть складатися з кількох струменів, які утворилися під час послідовних і періодич-

них магнітних перез'єднань. За доплерівськими зсувами компонентів профілів було розраховано променеві швидкості ($V_{\text{пр}}$) руху хромосферної речовини у сержах. Проаналізовано зміни $V_{\text{пр}}$ уздовж поперечного розрізу струменів сержів в місці їхньої максимальної інтенсивності. Швидкість струменів була різною і, напевно, залежала від структури магнітного поля у сержі і навколишньому середовищі. Різним був і напрямок руху струменів — він залежав від фази розвитку сержа. Більшість кривих зміни $V_{\text{пр}}$ складалася з кількох відрізків. Це вказує на те, що великі струмені склалися з кількох дрібніших струменів, тобто вони мали волокнисту структуру. Висхідні і низхідні потоки сержа часто виникали одночасно і збігалися в часі зі збільшенням яскравості БЕ. У одному з викидів протягом близько 3 хв спостерігався вихровий рух плазми, про що свідчать похилі темні смуги у спектрах. На момент найбільшої яскравості БЕ на досліджуваній ділянці АО спостерігалися сім сержів, причому у трьох із них плазма опускалася зі швидкістю до 77 км/с, а у п'яти — підіймалася з набагато меншою швидкістю до -35 км/с. Під час наших спостережень максимальна швидкість руху плазми вгору у сержах досягала -110 км/с, а вниз — 90 км/с. У верхній частині магнітних петель, на рівні утворення ядра лінії H, значення $V_{\text{пр}}$ плазми змінювались між -25 км/с і 22 км/с. Значення швидкості на ділянці без активних утворень не перевищували ± 2 км/с. Також проаналізовано, чи пов'язані процеси еволюції САВ та фази розвитку БЕ. Наша робота заснована на детальному дослідженні спостережних даних, які було отримано з високою просторовою і часовою роздільною здатністю. Це дозволило краще зрозуміти динаміку еволюції системи аркових волокон, під якою виникла і розвивалася бомба Еллермана, а також виявити особливості утворення і розвитку сержів, які формувалися в її магнітних петлях. Ймовірно, вони були результатом послідовних і періодичних магнітних перез'єднань, які були пов'язані з виходом нового змієподібного магнітного потоку і відбувалися при взаємодії його петель з уже наявним навколишнім магнітним полем АО, або між магнітними петлями самого потоку.

Ключові слова: Сонце, активна область, хромосфера, спектри, магнітні перез'єднання, H-викиди, променеві швидкості.

ВСТУП

Спостереження показують, що вихід нових магнітних потоків на ранній стадії розвитку активної області (АО) супроводжується такими дрібномасштабними елементами сонячної активності, як мікроспалахи, бомби Еллермана (БЕ) та викиди хромосферної речовини (H-викиди). У більшості робіт, присвячених вивченню механізму утворення БЕ та H-викидів, зроблено висновок, що вони виникають в результаті процесів магнітних перез'єднань, які відбуваються на малій висоті в атмосфері Сонця при взаємодії нового магнітного потоку, що в цей час

виходить, з вже наявним навколишнім полем [8, 10, 12, 17, 21, 23, 25, 27, 38, 49, 51, 52]. При цьому частина накопиченої магнітної енергії перетворюється в тепло, а частина — у кінетичну енергію імпульсних явищ, таких як H^- -викиди (джети та сержі). Зв'язок між бомбами Еллермана та H^- -викадами був помічений давно і досліджувався у багатьох роботах [1, 14, 31, 38, 42, 58]. Було встановлено, що 86 % бомб Еллермана в області поблизу лімба і 56 % БЕ у центрі диска супроводжувалися невеликими короткочасними хромосферними викидами [40], а також що більшість БЕ розташовуються під системами аркових волокон (САВ), так званими Arch Filament Systems (AFS) [5—7, 10, 15, 58]. Области виходу нового магнітного потоку демонструють складну тонку структуру і відповідають місцям, де магнітне поле проривається через поверхню Сонця у вигляді висхідних петель. Характерна конфігурація, утворена цими магнітними петлями, зазвичай називається системою аркових волокон [5—7]. Вона виникає між спливаючими протилежними полярностями (наприклад, сонячні плями, що є фотосферною основою магнітних петель) і проявляється в хромосфері як висхідний щільний і холодний матеріал, що міститься у магнітних петлях [5]. Помірні висхідні потоки виявляються у центральних частинах фібрил, тоді як сильні низхідні потоки виявляються у їхніх кінцівках [7]. У пізнішій роботі [44] променеві швидкості, визначені на основі доплерівських вимірювань, підтверджують це. При спостереженнях утворення САВ вказує на вихід нового магнітного потоку у вигляді H^- -петель. Отримані в роботах [33, 34] дані дозволяють припустити, що системи хромосферних аркових волокон утворюються не в результаті плавної появи великомасштабних H^- -петель з-під фотосфери, а, швидше, — в результаті підйому хвилеподібних (змієподібних) трубок потоку. Виникнення змієподібного (серпантинного) потоку описано в роботах [3, 10, 33, 45, 46, 49]. Теоретичне моделювання [2, 10, 11, 17, 19, 49] показало, що в конвективній зоні безпосередньо під фотосферою магнітний потік накопичується і фрагментується на струмові трубки. Трубки повинні бути певною мірою скручені у вигляді горизонтального джгута [28], який завдяки силам плавучості піднімається в нижню фотосферу. У фотосфері під дією сил плавучості та турбулентних конвективних рухів деякі частини джгута виштовхуються вгору, що призводить до змієподібної форми — відбувається утворення магнітних петель, які піднімаються через фотосферу та хромосферу в корону. Для виникнення змієподібного потоку має відбутися перез'єднання, щоб видалити U-подібні ділянки поля, які захоплюють щільну плазму та перешкоджають його виникненню [33]. Вважається, що при появі верхні частини джгута утворюють системи хромосферних аркових волокон. Для спостерігача вихід змієподібного поля виглядає як безліч невеликих біполярних фрагментів між основними полярностями [46].

Викиди хромосферної речовини є прикладом потоків плазми, які виникають в результаті повторного перез'єднання між серпантинни-

ми петлями і навколишнім полем [49]. Вони бувають або прями, або мають злегка вигнуту форму і виглядають на диску Сонця як темні (сержі — *serges*), так і яскраві утворення (джети — *jets*) [8, 9, 60]. Зазвичай термін «серж» використовується для викидів холодної та щільної плазми, які спостерігаються в хромосферних лініях, таких як $H\alpha$ і $H\beta$, а термін «джет» — для викидів, що спостерігаються в ультрафіолетових та рентгенівських променях [27].

Багато моделей було запропоновано для формування сержів та джетів. В роботі [8] їх класифікували відповідно до джерел утворення: тиск газу, ударна хвиля, сила магнітного натягу та магнітний тиск (останні дві моделі з обертанням і типу «насіння дині»). У роботі [43] було проведено одновимірне гідродинамічне моделювання сержів з метою з'ясування їхнього походження та структури. Вони розглядалися як струмені, що утворюються ударною хвилею, яка генерується при раптовому підвищенні тиску та поширюється через хромосферу. У роботі [55] було підтверджено цей висновок на основі спостережень — було виявлено ознаки магнітного перез'єднання в основі сержа. Це дозволило припустити, що ударні хвилі, які генеруються виділенням енергії за рахунок магнітного перез'єднання у нижніх шарах атмосфери, поширюються у хромосферу і викликають утворення сержів. Результати, отримані на основі двовимірних (2D) [30, 57], а пізніше і тривимірних (3D) моделей [2, 13] показали, що перез'єднання, які відбуваються в областях виходу нових магнітних потоків, дійсно сприяють утворенню $H\alpha$ -викидів.

Статистичні, морфологічні, магнітні та динамічні властивості сержів вивчаються давно [24, 27, 39—41, 47]. Було зроблено висновок, що потоки сонячної плазми в них контролюються магнітними полями, а траєкторії їхнього руху відповідають магнітним силовим лініям. Спостереження з високою роздільною здатністю показали, що структура сержів сильно волокниста [41, 50, 61]. Супутні бомбам Еллермана викиди мають доплерівські швидкості в діапазоні від 20 до 200 км/с, спрямовані як вгору, так і вниз [31, 38, 53]. Зазвичай вони утворюються через кілька хвилин після появи БЕ, живуть протягом 10...20 хв і зникають. Ретельні вимірювання траєкторій $H\alpha$ -викидів чітко показують, що вони містять навіть обертальні рухи, також зумовлені магнітним полем [8, 16, 23, 24, 54, 56, 61]. У роботі [59] представлено тривимірне моделювання хромосферних струменів із закрученими силовими лініями магнітного поля.

Проте деталі механізму руху хромосферних викидів ще до кінця не вивчено [4, 8, 48, 56]. Залишається також неясним, чому тільки деякі БЕ супроводжуються $H\alpha$ -викидами. Який взаємозв'язок між висхідною і низхідною матерією у $H\alpha$ -викидах [26]? Все ще вимагає уточнення зв'язок між еволюцією магнітних полів і тонкою структурою сержів [17].

Оскільки динаміка сержів є рух плазми уздовж силових ліній магнітного поля, сержі корисні для вивчення структури магнітного поля і

її змін [4]. Було виявлено, що дрібномасштабні магнітні перез'єднання можуть відігравати важливу роль в енергетичному балансі сонячної хромосфери — вони ефективно допомагають інjektувати щільну плазму у верхні шари атмосфери [27]. Крім того, дослідження показали, що викиди плазми із глибинних шарів Сонця є основною причиною розігріву сонячної корони [22, 29]. В роботах [18, 62] вивчався зв'язок сержів із волокнами, було виявлено, що посилення активності утворення сержів може викликати ерупцію волокна, що, як відомо є передвісником розвитку спалаху і може мати прогностичний характер.

Для розуміння природи цих цікавих високодинамічних явищ важливо детально досліджувати на основі спостережних даних з високою просторовою та часовою роздільною здатністю їхнє утворення та розвиток, а також зв'язок з іншими активними явищами в сонячній атмосфері [32, 38]. Крім того, як правильно зазначено в роботі [50], дослідження викинутої імпульсної плазми за допомогою H -спектроскопії високої роздільної здатності проводяться нечасто, і ми маємо все ще мізерні знання про спектральні характеристики сержів.

У даній роботі, яка є продовженням робіт [1, 36, 37], на основі спектрополяриметричного матеріалу з високими просторовою і часовою роздільними здатностями ми продовжуємо вивчати динаміку атмосфери ділянки активної області NOAA 11024, на якій сформувалася система аркових волокон (САВ), і під нею виникла і розвивалася бомба Еллермана. У першій частині роботи [36] вивчено особливості еволюції бомби Еллермана. У другій частині роботи ми вивчаємо еволюцію системи аркових волокон і досліджуємо утворення і розвиток усіх H -викидів, які сформувалися в її магнітних петлях під час наших спостережень, а також як пов'язані процеси еволюції САВ та фази розвитку БЕ.

АКТИВНА ОБЛАСТЬ NOAA 11024. СПОСТЕРЕЖЕННЯ

У даній роботі на основі спектрополяриметричного матеріалу з високими просторовою (~ 1) і часовою (~ 3 с) роздільними здатностями ми продовжуємо вивчати динаміку атмосфери активної області NOAA 11024 (АО). Активна область виникла як простий біполь на спокійному Сонці 29 червня 2009 р. на східному лімбі і залишалася відносно спокійною майже до кінця 3 липня. У день наших спостережень 4 липня вона була в основній фазі свого розвитку і перебувала на сонячному диску поблизу центрального меридіана, її координати — S25E02 (-29 , -449), тому всі параметри, що визначалися, були без істотного впливу проєкції. Активність АО швидко зростала — у різних місцях виходили нові магнітні потоки [12, 49]. Досліджувана ділянка АО була розташована в області одного з таких потоків. Це була серія невеликих ділянок зі змішаною полярністю, так зване серпантинне маг-

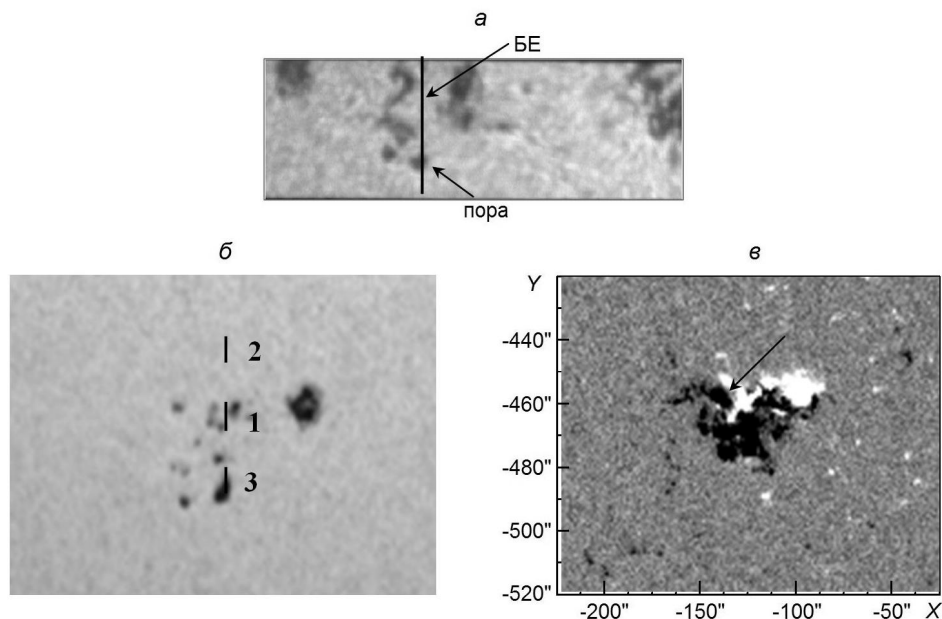


Рис. 1. *a* — досліджувана ділянка активної області NOAA 11024 4 липня 2009 р. вертикальна лінія — положення щілини спектрографа; *б* — зображення Сонця у білому світлі, отримане о 11:12 UT; *в* — магнітограма АО, отримана SOHO/MDI, білий і чорний колір — позитивна і негативна полярності відповідно, стрілкою показано досліджувану ділянку

нітне поле. У роботі [10] на основі аналізу даних з космічного корабля «Hinode», отриманих за два 54-хв періоди під час появи АО 11024 представлено сценарій виникнення змісподібного магнітного потоку. На рис. 1*a* показано досліджувану ділянку АО, вертикальна лінія вказує положення щілини спектрографа, яка перетинала пору і БЕ, що розвивалася. На рис. 1*б* приведено зображення Сонця у білому світлі за даними SOHO/MDI, отримане у день спостережень о 11:12 UT. Поле зору THEMIS у поляриметричній конфігурації ділиться на три частини, кожна з яких має довжину близько 16 \prime . Відрізками 1, 2, 3 позначено ділянки АО у полі зору. Частину активної області, яку ми досліджували, позначено «1», її корисна довжина становила 14 \prime (10 Мм). На рис. 1*в* дано MDI-магнітограму АО, отриману о 9:36 UT.

Спостереження одночасно у п'яти ділянках спектру були проведені О. В. Хоменко 4 липня 2009 р. на франко-італійському 90-см вакуумному телескопі THEMIS Інституту астрофізики на Канарських островах (Іспанія, острів Тенеріфе). У цій роботі ми використовуємо одну з них, яка містить центральну частину хромосферної лінії H α . Відомо, що добре вивчена спектральна лінія поглинання H α розкриває властивості високоструктурованої та динамічної сонячної хромосфери. Спостереження проводились при фіксованій щілині спектрографа, ширина якої становила 0.5 \prime , час накопичення сигналу 0.12 с. Протягом

20 хвилин ($9^h52^m \dots 10^h11^m$ UT) було отримано 400 спектрів. Ми використали 36 найбільш якісних.

Детальний опис розглянутих у роботі спектрів наведено на рис. 3, 4, 5, 7, 8 (фрагменти *a*). На спектрах вказано номер спектру і час, коли він був отриманий. Верхня ділянка спектру L2 («2» на рис. 1б) була без активних утворень і лежала поза областю магнітних потоків, що в цей час виходили. Наявність спектру цієї ділянки дало нам можливість вивчити зміни в сонячній атмосфері на досліджуваній нами ділянці L1 («1» на рис. 1б) під дією бомби Еллермана, яка розвивалася [36], і хромосферних викидів (сержів), які на кожному спектрі зазначені номерами. На всіх спектрах викиди видно у поглинанні як в довгохвильовому, так і в короткохвильовому крилі лінії H α , що відповідає руху плазми як вгору, так і донизу. Дві протяжні емісійні смуги в крилах лінії H α , тоді як центральна частина лінії зайнята поглинанням — це бомба Еллермана, яка розвивалася. Яскравість емісійних смуг змінювалася від спектру до спектру, однак більш інтенсивним на всіх спектрах, як і у більшості БЕ, було короткохвильове крило.

БОМБА ЕЛЛЕРМАНА

У роботі [36] детально описано особливості розвитку бомби Еллермана під час наших спостережень. Досліджено часові варіації інтенсивності у крилах лінії H α в області БЕ (світлові криві БЕ) на відстанях ± 0.16 та ± 0.1 нм від центра лінії (рис. 5 у роботі [36]). Вони показують, що кілька разів відбувалося різке збільшення інтенсивності в крилах лінії H α . Це свідчить про те, що в цей час відбулися магнітні перез'єднання. На отриманих світлових кривих БЕ було виділено два періоди. Перший період, протягом якого інтенсивність змінювалася мало, тривав близько 8 хв (9:57:05...10:05:21 UT). Він складався з 3 піків інтенсивності з часовим інтервалом 1 хв 45 с. Другий період тривалістю близько 6 хв (10:05:21...10:11:26 UT), протягом якого яскравість БЕ збільшувалася, складався з п'яти піків інтенсивності (інтервал порядку 1 хв). Отримані в роботі [36] світлові криві БЕ показали, що ми спостерігали дві фази її еволюції: фазу попереднього нагрівання і спалахову (імпульсну) фазу, під час яких відбувалося поступове і імпульсне виділення енергії. Це узгоджується з висновком, зробленим в багатьох роботах про те, що бомби Еллермана виникають в результаті послідовних і переривчастих магнітних перез'єднань, що призводить до коливань їхньої яскравості з часом. На рис. 2 показано часові криві зміни інтенсивності емісії лінії H α (світлові криві БЕ) у короткохвильовому (суцільна крива) та довгохвильовому (пунктирна крива) крилах на відстані ± 0.16 нм від її центра, цифрами вказано моменти піків інтенсивності. У таблиці зазначено номери піків яскравості БЕ у синьому (*a*) і червоному (*b*) крилах лінії H α та відповідний їм час спостережень і номер спектру.

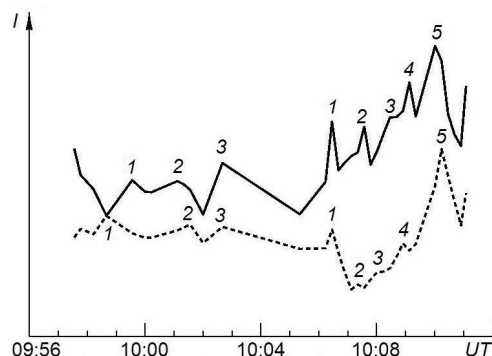


Рис. 2. Зміни з часом інтенсивності емісії у крилах лінії H α на відстані ± 0.16 нм від її центра: у короткохвильовому (суцільна крива) та довгохвильовому (пунктирна крива) крилах; цифрами вказано номери піків інтенсивності

Таблиця 1. Номер піку яскравості БЕ у синьому (а) і червоному (б) крилах лінії H α ; відповідний їм час спостережень і номер спектру

Пік	а (синє крило)		б (червоне крило)	
	Час спостережень	Номер спектру	Час спостережень	Номер спектру
Фаза попереднього нагріву				
1	09:59:12 UT	(140)	09:58:16 UT	(120)
2	10:00:52 UT	(175)	10:01:20 UT	(185)
3	10:02:31 UT	(210)	10:02:31 UT	(210)
Імпульсна фаза				
1	10:06:32 UT	(295)	10:06:32 UT	(295)
2	10:07:42 UT	(320)	10:07:28 UT	(315)
3	10:08:39 UT	(340)	10:08:11 UT	(330)
4	10:09:22 UT	(355)	10:09:08 UT	(350)
5	10:10:18 UT	(375)	10:10:33 UT	(380)

ЕВОЛЮЦІЯ СИСТЕМИ АРКОВИХ ВОЛОКОН. ОСОБЛИВОСТІ РОЗВИТКУ ХРОМОСФЕРНИХ ВИКИДІВ

Для дослідження особливостей еволюції системи аркових волокон (САВ), під якою розвивалася бомба Еллермана, ми детально розглянемо спектри, отримані в різні моменти спостережень. Для кожного спектру наведено зміни інтенсивності вздовж щілини спектрографа у крилах лінії H α на відстані ± 0.1 нм та ± 0.16 нм від її центра; зміни форми профілів лінії H α ; зміни променевої швидкості ($V_{пр}$) хромосферної речовини уздовж поперечного розрізу струменів, з яких склалися H α -викиди, у місці їхньої максимальної інтенсивності. Також ми дослідимо, чи пов'язані процеси еволюції САВ та фаз розвитку БЕ.

Вибрано спектри, отримані у моменти пікової інтенсивності на світлових кривих БЕ. Перші два спектри, розглянуті в роботі, було от-

римано під час першої фази розвитку бомби Еллермана — фази попереднього нагріву [36]. На цих спектрах сержі мають вигляд окремих темних деталей. Їхні профілі добре виділяються на крилах лінії H_{α} , за їхніми зсувами можна точно визначити променеву швидкість руху речовини. Інші три спектри були отримані під час імпульсної фази розвитку БЕ. На них деталі сержів перекриваються один з одним, тому визначення $V_{пр}$ було утруднене.

Спектр 100. Під час наших спостережень на ділянці АО, яку ми досліджуємо, розвивалися вже наявні та формувалися нові H_{α} -сержі. На рис. 3а представлено один з перших H_{α} -спектрів, які ми вивчаємо, отриманий о 9:57:19 UT. Ширина ділянки спектру, що містить центральну частину лінії H_{α} , становила близько 0.6 нм. На спектрі вказано номер спектру і час, коли він був отриманий, а також положення пори і бомби Еллермана. Вертикальними лініями A1, A2 та B1, B2 відзначено фотометричні розрізи поперек спектрів на відстані ± 0.1 та ± 0.16 нм від центра лінії. Видно, що центральна частина лінії H_{α} освітлена у порівнянні зі спектром ділянки L2, тобто область формування ядра лінії була прогріта. У короткохвильовому крилі лінії H_{α} видно п'ять сержів, які в цей час були на ділянці L1 — їх позначено номерами. Викиди 1 і 2 виникли по різні боки біля пори, викиди 4 і 5 — поряд та над областю розвитку бомби Еллермана, а викид 3 — у середній частині ділянки. Видно, що викиди 1, 3 і 5 склалися з одного струменя. Сержі 2 і 4 склалися з двох струменів — темні деталі видно в синьому крилі і ядрі лінії H_{α} . У роботі [55] на основі спостережень отримано висновок, що за утворення кількох хромосферних струменів у спливаючій магнітній петлі відповідають множинні ударні хвилі, які генеруються під час магнітних Perez'єднань. Також зроблено висновок, що, мабуть, саме дрібномасштабна структура магнітного поля і магнітного Perez'єднання в нижніх шарах атмосфери відповідальна за багатострумову структуру сержів. На спектрах кожен струмінь ототожнюється з раптовою появою абсорбційної особливості на синьому крилі лінії H_{α} , яка поступово зміщується в червоне крило.

На рис. 3б наведено зміни інтенсивності в умовних одиницях вздовж щілини спектрографа в крилах лінії H_{α} на відстані ± 0.1 нм та ± 0.16 нм від її центра. Криві A1 і B1 побудовано по короткохвильовому (синьому) крилу лінії H_{α} (розрізи A1 і B1 на рис. 3а), а A2 і B2 — по довгохвильовому (червоному) крилу (розрізи A2 і B2 на рис. 3а). На кривих зазначено, яке зменшення інтенсивності відповідає якому викиду. Розріз B1 перетинає сержі 2, 3 і 4, місце розташування яких на ділянці АО добре видно на кривій B1. Видно також, що струмінь сержа 2, профіль якого проектувався на синє крило лінії H_{α} , складався з двох менших струменів [1].

За спектрами було отримано I-профілі Стокса лінії H_{α} з інтервалом, що відповідає 160 км на поверхні Сонця. На рис. 3в показано профілі лінії H_{α} , отримані для місць максимальної інтенсивності різних

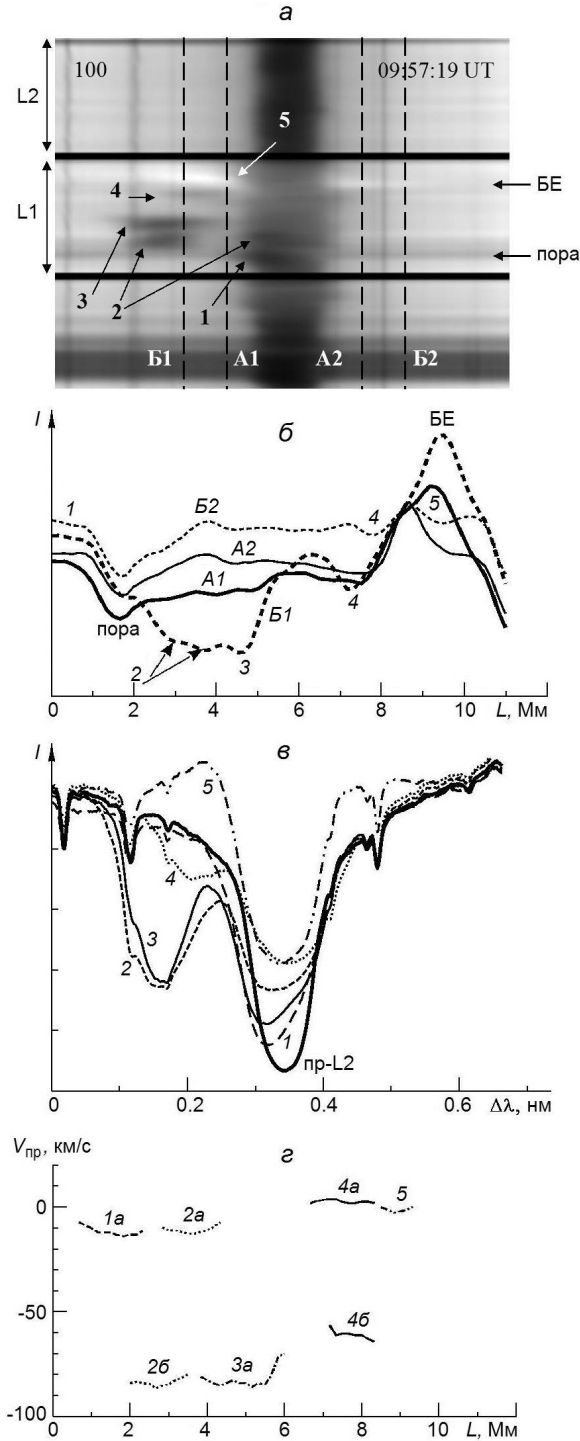


Рис. 3: а — H -спектр № 100, отриманий о 09:57:19 UT; БЕ — бомба Еллермана; L1 — досліджувана ділянка АО, L2 — ділянка АО без активних утворень і поза областю магнітних потоків, цифрами позначено H -викиди; вертикальні лінії А і Б — фотометричні розрізи на відстані ± 0.1 та ± 0.16 нм від центра лінії; б — зміни інтенсивності вздовж щілини спектрографа в крилах лінії H на відстані ± 0.1 нм (A1 і B1) та ± 0.16 нм (A2 і B2) від її центра; в — профілі лінії H для сержів 1...5 (пр-L2 — для незбуреної ділянки L2); г — зміни хромосферної променевої швидкості уздовж поперечного розрізу струменів сержів 1...5 (позитивні значення — рух від спостерігача)

викидів. Видно, що вони значно відрізнялися від профілю пр-L2 для незбуреної хромосфери ділянки L2. Відомо, що зміни форми профілів лінії H відображають зміни фізичного стану сонячної хромосфери. В залежності від того, догори чи донизу рухався викид, і з якою швидкістю, компонент профілю, що відповідав йому, проектувався на синє (висхідні потоки) або червоне (низхідні потоки) крило лінії H. Якщо ж профіль викиду проектувався на ядро лінії H, відбувалося викривлення профілю і зміщення його центральної частини у червоний чи синій бік. Бачимо, що профілі сержів, які розвивалися в цей час, переважно проектувалися на синє крило лінії. Профілі сержів 1 і 5, а також другий компонент сержа 2 проектувалися на ядро лінії і трохи на синє крило, яке внаслідок цього зсунулось у синій бік спектру. Другий компонент сержа 4 проектувався на ядро і червоне крило лінії (крива B2 на рис. 3б), тому профіль лінії зсунувся у червоний бік спектру.

Видно, що отримані профілі лінії H ослаблені, і це вказує на прогрів області формування ядра лінії. Основний компонент профілів розширений по відношенню до профілю пр-L2 на 27...38%. Півширини ($\Delta\lambda_{1/2}$) профілів 1...5 лежали між 0.122 і 0.133 нм, тоді як $\Delta\lambda_{1/2}$ профілю пр-L2 дорівнювала 0.096 нм.

За доплерівськими зсувами компонентів профілів лінії H, які відповідали сержам, відносно положення ядра лінії H в лабораторному спектрі було розраховано променеві швидкості ($V_{пр}$) руху хромосферної речовини у викидах. Враховувалися всі необхідні поправки: за обертання Землі навколо своєї осі і навколо Сонця, обертання Сонця і гравітаційне зміщення. Значення хромосферної швидкості на ділянці L2 без активних утворень не перевищували ± 2 км/с.

На рис. 3г показано, як змінювалася променева швидкість хромосферної речовини уздовж поперечного розрізу сержів у місці їхньої максимальної інтенсивності. Додатні значення $V_{пр}$ відповідають руху плазми від спостерігача, а від'ємні — до спостерігача. Видно, що всі отримані криві складаються з кількох відрізків. Хромосферна речовина в сержі 1а рухалась вгору з $V_{пр}$, яка не перевищувала -15 км/с, на краю біля пори швидкість була більшою ніж на протилежному краї. Значення $V_{пр}$ плазми у струмені 2а, що проектувався на ядро лінії, змінювалось між -7 та -13 км/с, максимальним воно було в середній частині сержа і меншим — по краях. Видно, що крива 2б для другого струменя сержа складається з двох відрізків, тобто струмінь 2б складався з двох менших струменів. Висхідна швидкість хромосферної речовини в одному струмені змінювалась від -83 до -86 км/с, а в другому — від -85 до -80 км/с. У сержі 3, який був також дуже структурованим (крива 3), променева швидкість уздовж поперечного розрізу змінювалась від -70 до -86 км/с, найбільше значення $V_{пр}$ спостерігалось в середині сержа. У магнітній петлі 4 рухались два струмені — 4а і 4б. Струмінь 4б складався з двох менших струменів, розташованих поряд, значення $V_{пр}$ в них змінювались між -56 і -61 км/с та -61 і

–64 км/с. На рівні утворення ядра лінії H γ у струмені 4a відбувались невеликі коливання швидкості низхідного руху між 1 і 4 км/с. Ймовірно, хромосферна речовина цього струменя досягла певної висоти і почала рухатись донизу. Хромосферна речовина в сержі 5 рухалася вгору зі швидкістю, яка не перевищувала –5 км/с. П'ятий викид та БЕ, можливо, виникли одночасно в результаті повторного перез'єднання однієї з петель змісподібного магнітного поля, що піднімалося, і наявним раніше магнітним полем — відбулося енерговиділення, яке забезпечило утворення БЕ і викид хромосферної речовини.

На рис. 3a — 3г видно, що в цей час всі сержі (крім струменя 4a) спостерігались в синьому крилі лінії, тобто в них відбувався рух хромосферної речовини вгору. Всі криві зміни $V_{\text{пр}}$ склалися з кількох відрізків, тобто H γ -викиди мали волокнисту структуру. Великі струмені склалися з кількох менших струменів. Така особливість сержів зазначена у роботах [50, 55, 61].

Спектр 180 було отримано о 10:01:06 UT через 3^m47^s після попереднього. Вид досліджуваної ділянки значно змінився (рис. 4a), що вказує на зміну конфігурації магнітного поля. За цей час спостерігались два піки підвищення яскравості бомби Еллермана (рис. 2) — ознака магнітних перез'єднань. Площа пори, що вже була до цього, зросла приблизно на 60 %, і на відстані 0.16 Мм від неї почала формуватися нова пора. Відповідне пониження інтенсивності добре видно на кривих A1 і B1 (рис. 4б). Ймовірно, в цьому місці спливала нова магнітна петля, і в її основі формувалася пора. Як і на попередньому спектрі, майже всі сержі, які в цей час вже були, видно в короткохвильовому крилі лінії H γ , вказуючи на те, що в них відбувався висхідний рух речовини, і тільки у магнітній петлі 2 вже спостерігався низхідний рух — темні деталі видно в ядрі і червоному крилі лінії.

Цікаво відмітити, що під час 2-го піку підвищення яскравості бомби Еллермана (10:00:52 UT, спектр 175) біля пор і над порами на ділянці, довжина якої становила близько 2.5 Мм (рис. 4a, б, г), протягом лише 30 с відбувся масштабний викид хромосферної речовини вгору з великою швидкістю до –77 км/с. Коли швидкість зменшилась приблизно до –60 км/с, викид зник. На спектрі в синьому крилі лінії видно протяжну по висоті темну деталь невеликої інтенсивності — її позначено цифрою 1. На кривій B1 (рис. 4б) видно зменшення інтенсивності в цьому місці. Місце максимального зменшення інтенсивності в синьому крилі профілю 2, на яке проєктується профіль цього викиду (стрілка 1 на рис. 4в), відповідає швидкості $V_{\text{пр}} = -63$ км/с. Швидкість руху плазми вздовж поперечного розрізу цього викиду змінювалась від –63 км/с до –66 км/с (рис. 4г).

На рис. 4в наведено профілі, отримані по спектру 180. Видно, що тільки у профілю 2 центральна частина і червоне крило зсунуті у червоний бік спектру. Якщо простежити зміну профілів за час, який пройшов між отриманням спектрів 100 і 180, можна побачити, що інтенсивність струменя 2a зменшилась, і він припинив своє існування. У

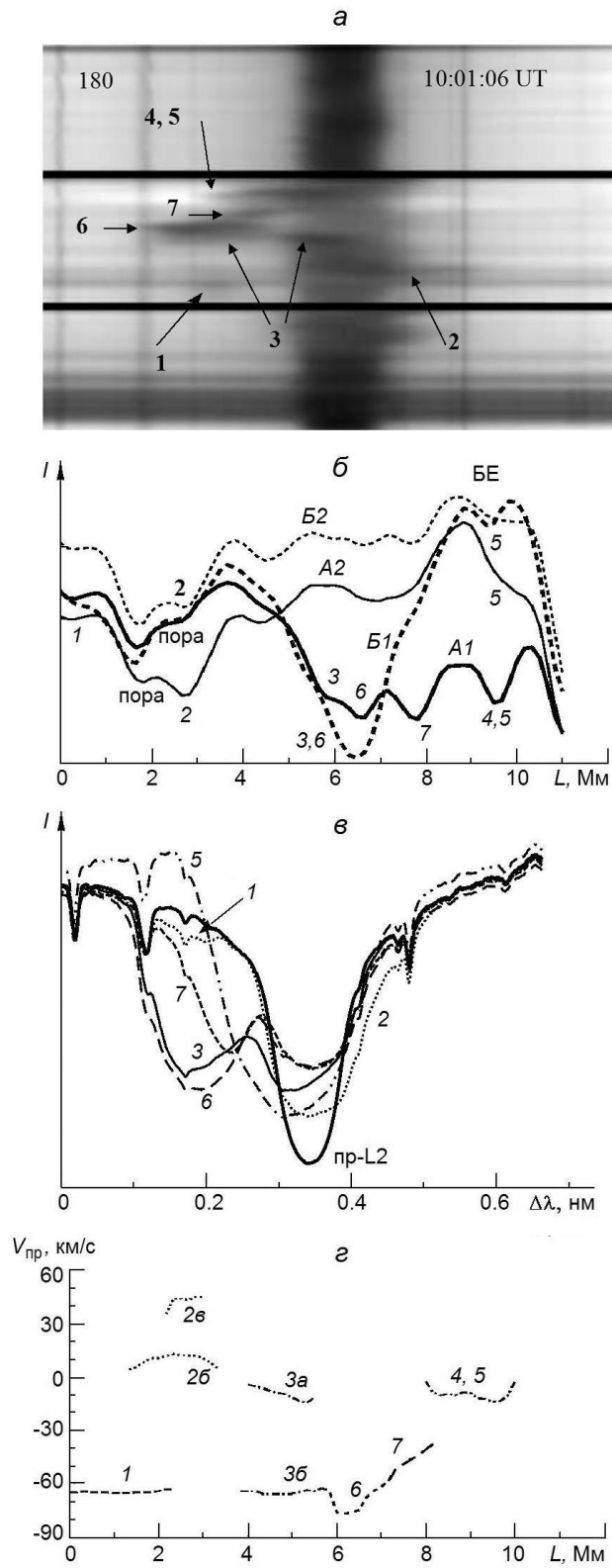


Рис. 4. Те саме, що й на рис. 3, але для спектру 180

струмені 2б відбулось поступове зменшення $V_{\text{пр}}$ висхідного руху, а потім і зміна його напрямку — висхідний рух змінився на низхідний. Ймовірно, речовина досягла верхньої частини петлі, і під дією сили тяжіння почала рухатися донизу. Крива 2б на рис. 4г показує, що максимальна швидкість до 13 км/с спостерігалась у середній частині струменя, вздовж поперечного розрізу $V_{\text{пр}}$ зменшувалась, і на краях вона не перевищувала 4.5 км/с. Під час другого піку інтенсивності на світловій кривій бомби Еллермана у магнітній петлі 2 з'явився новий струмінь 2в, на це вказує темна деталь у червоному крилі лінії H α . У ньому спостерігався низхідний потік хромосферної речовини з $V_{\text{пр}}$, яка збільшувалась вздовж поперечного розрізу від 35 до 45 км/с. Ймовірно, він утворився в результаті магнітного перез'єднання разом з висхідним потоком 1. На кривих A2 і B2 (рис. 4б), які показують зміни інтенсивності в червоному крилі лінії H α , добре видно зменшення інтенсивності, які відповідають струменю 2в.

У цей час у магнітній петлі 3 також проявились два струмені з висхідним рухом речовини — темні деталі в ядрі (струмінь 3а) та в синьому крилі (струмінь 3б) лінії H α (рис. 4а). Профіль струменя 3а проєктувався на центральну частину основного профілю 3, тому вона зсунута у синій бік спектру, а профіль струменя 3б проєктувався на синє крило лінії (рис. 4в). Вздовж поперечного розрізу струменя 3а $V_{\text{пр}}$ збільшувалась від -4 до -14 км/с. За час між спектрами 100 і 180 (майже 4 хв) швидкість руху хромосферної речовини у струмені 3а (рис. 3з) поступово зменшилась (крива 3а на рис. 4з). Під час другого піку збільшення яскравості БЕ в цій магнітній петлі з'явився новий струмінь 3б з невеликою інтенсивністю, але з великою швидкістю, яка змінювалась вздовж поперечного розрізу між -62 та -65 км/с (крива 3б на рис. 4з).

Якщо розглянути спектри 155...185, які було отримано між 9:59:55 і 10:01:20 UT, можна прослідкувати, що за цей час магнітна петля 4 зсунулася у бік області БЕ, і серж 4 став проєктуватися на область БЕ і 5-го сержу, який над нею розвивався. На спектрі 180 на тлі світлої смуги видно дві темні деталі з різною інтенсивністю, які накладалися одна на одну, і визначити межу між ними було неможливо. Тобто, над БЕ в цей час відбувалися два викиди з різними швидкостями висхідного руху — крива зміни $V_{\text{пр}}$ (рис. 4з) вздовж цієї області складалася з двох відрізків. На рівні утворення ядра лінії H α швидкість руху речовини в цій області змінювалась між -3 і -8 км/с та -8 і -3 км/с, $V_{\text{пр}}$ в середній частині сержа 5 досягала -14 км/с.

На спектрі в синьому крилі лінії H α з'явилися дві нові темні деталі. Поряд з магнітною петлею 3 спливали дві нові петлі, в яких розвивалися 6-й і 7-й сержі. В роботі [10] зазначено, що поява у I-спектрі Стокса темної особливості є ознакою прориву магнітної трубки через фотосферу, що підтверджується теоретичним моделюванням та спостереженнями. Серж 6 з'явився вперше на спектрі 120 (9:58:16 UT — 1-й пік інтенсивності в червоному крилі лінії H α на світловій кривій

БЕ) з невеликою інтенсивністю, але з $V_{\text{пр}} = -90$ км/с. Його інтенсивність поступово збільшувалась, і на профілі 6 (рис. 4в) інтенсивність профілю сержа більша від інтенсивності основного профілю лінії H α . Таке співвідношення між основним профілем лінії і профілем сержа, який на нього проектувався, отримано і в роботі [50]. Треба зазначити, що на кривій зміни інтенсивності A1 (рис. 4б) викиди 3б і 6 розділяються, а на кривій B1 їх розділити неможливо. На рис. 4г видно, що в цей час швидкість висхідного руху в центральній частині сержа 6 сягала -77 км/с, по краях вона була меншою — близько -60 км/с.

Серж 7 вперше з'явився на спектрі 175 (10:00:52 UT — 2-й пік інтенсивності в синьому крилі лінії H α на світловій кривій БЕ). Він мав ознаки обертального руху, про це свідчить похила темна деталь у спектрі. Однією з найцікавіших особливостей сержа є його обертання при висхідних та низхідних рухах [8, 35]. Виникнення хромосферного викиду з обертальним рухом речовини, зумовленого магнітним полем, розглянуто у роботах [8, 16, 23, 24, 54, 56, 61]. У роботах [20, 23] показано, що часто спостережувану спіральну структуру хромосферних викидів зумовлено сплетінням і скручуванням магнітного поля в результаті фотосферного конвективного руху. Дійсно, трубка потоку, що проходить через конвективну зону, повинна бути певною мірою скручена, щоб запобігти її розриву вихорами, що розвиваються на її шляху [28, 49, 56]. У роботах [8, 35, 59] зроблено висновок, що повторне магнітне перез'єднання між закрученими магнітними полями і раніше наявними відкритими полями може викликати закручений рух, що спостерігається у H α -викидах. В нашій роботі виявлено, що під час утворення 7-го сержу відбувалося магнітне перез'єднання (спостерігалось різке підвищення яскравості БЕ) і відбувались горизонтальні рухи — зсув магнітної петлі 4. На кривій A1 і на профілі 7 (рис. 4б і 4в) добре видно зменшення інтенсивності, яке відповідає викиду 7. Променева швидкість в цьому сержі змінювалася між -59 і -38 км/с. Спектральні спостереження сержа 30 грудня 1982 р. в лінії H α , розглянуті в роботі [24], показали наявність обертального руху. Було визначено швидкість обертання та справжню висхідну швидкість сержа. Швидкість обертального руху становила 20...30 км/с, яка з часом зменшувалася.

У період першої фази (попереднього нагріву) розвитку бомби Еллермана найбільш значні зміни на ділянці АО відбулися під час 2-го піку підвищення яскравості БЕ (10:00:52 UT, спектр 175). В результаті магнітних перез'єднань утворились нові струмені у магнітних петлях 2 і 3, біля області розвитку БЕ спливали дві нові петлі, виник хромосферний викид з обертальним рухом, біля пори, яка вже була, почала розвиватись нова пара.

Наступні три спектри було отримано під час імпульсної фази розвитку БЕ, яка почалася близько 10:05:21 UT (спектр 270).

Спектр 295 (рис. 5а) було отримано о 10:06:32 UT під час першого піку яскравості БЕ у спалаховій фазі її еволюції, через $5^m 26^s$ після

попереднього. На спектрі в синьому крилі і ядрі лінії H_{α} у магнітних петлях 2 і 3 видно нові струмені з висхідним рухом речовини. Також утворилися нові струмені з великою швидкістю низхідного руху у петлях 3 і 6, їх видно в червоному крилі лінії. Викид над БЕ сильно збільшився, він проєктувався на центр та червоне крило лінії.

Над порами в цей час розміщувався флокул, про що свідчить освітлення на спектрі в області ядра лінії H_{α} . Центральна частина профілів в цьому місці була ослабленою на 23 % (профіль 1 на рис. 5б) порівняно з профілем для незбуреної хромосфери (ділянка L2). Відомо, що флокули, області підвищеної яскравості в хромосфері, часто спостерігаються в околицях плям. В області флокула хромосферна речовина на висоті формування ядра лінії H_{α} рухалася з невеликою швидкістю біля ± 1 км/с (крива 1 на рис. 5з). Варто звернути увагу на те, що флокул займав ділянку довжиною близько 2.5 Мм, на якій під час першої фази розвитку БЕ протягом 30 с відбувся масштабний викид хромосферної речовини вгору з великою швидкістю (рис. 4).

Серж 2 складався з двох струменів, які видно в ядрі (струмінь 2г) і синьому крилі (струмінь 2д) лінії H_{α} . У струмені 2г спостерігався висхідний рух речовини, променева швидкість якого збільшувалася вздовж поперечного розрізу від -1 до -12 км/с, при цьому речовина біля пори рухалася з меншою швидкістю (рис. 5з). У другому струмені 2д з одного краю променева швидкість речовини сягала -100 км/с і зменшувалася до -86 км/с вздовж поперечного розрізу. У профілі 2 центральна частина і синє крило зсунуті в короткохвильовий бік спектру. На рис. 5б можна бачити, що на кривій A1 струмені 2д і 3б не розділяються, але на кривій B1 добре видно зменшення інтенсивності, яке відповідає струменю 2д.

У магнітній петлі 3 рухалися як висхідний, так і низхідний потоки — струмені 3б і 3в відповідно. Темні деталі видно в ядрі та обох крилах лінії H_{α} (рис. 5а). У верхній частині профілю 3 зменшення інтенсивності відбулось і в синьому, і в червоному крилі (синя і червона асиметрія). За проміжок час між спектрами 180 і 295 променева швидкість у струмені 3б, який рухався вгору, зменшилась до -33 км/с (рис. 4г та 5з). Утворився новий струмінь 3в з невеликою інтенсивністю і з низхідним рухом речовини. Він складався з двох менших струменів, які рухалися донизу поруч — добре видно на кривій A2 (рис. 5б). Крива 3в на рис. 5з складалася з двох відрізків. Максимальне значення $V_{\text{пр}} = 53$ км/с спостерігалось на внутрішніх краях струменів, на зовнішніх краях воно було меншим — 50 і 46 км/с. На рівні утворення ядра лінії H_{α} в цьому місці спостерігався висхідний рух плазми з $V_{\text{пр}} = -9 \dots -16$ км/с.

Серж 6 складався з двох струменів плазми, 6а і 6б. Під дією сили гравітації відбулось уповільнення висхідного руху струменя 6а (рис. 4г та 5з), і в цей час $V_{\text{пр}}$ в його середній частині не перевищувала -12 км/с, по краях вона була меншою -7 і -9 км/с. Сформувався новий струмінь 6б. Його добре видно в червоному крилі лінії і на кривій A2

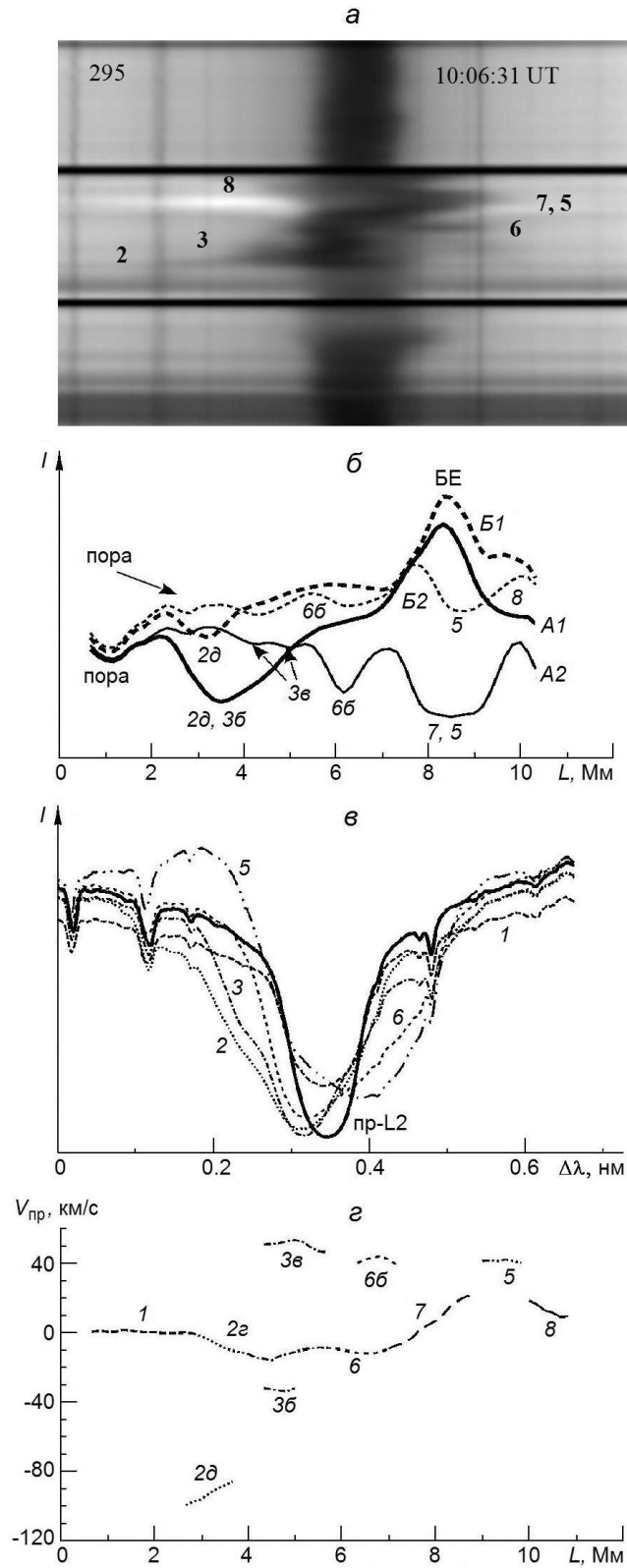


Рис. 5. Те саме, що й на рис. 3, але для спектру 295

(рис. 5а і 5б). Це означає, що він рухався вниз. У профілів лінії H для ділянки спектру, що відповідає положенню струменя 6б (профіль б на рис. 5в), центральна частина зміщена в синій бік спектру відносно профілю для незбуреної хромосфери (ділянка L2), а середня частина червоного крила профілю спочатку різко зсувалася в червоний бік спектру, а потім так само різко зміщувалася назад до червоного крила профілю L2. Променева швидкість низхідного руху в середній частині цього струменя становила 44 км/с, а по краях була меншою — близько 40 км/с (рис. 5г).

Серж 7, який утворився біля області розвитку БЕ і мав ознаки обертального руху (закрутка магнітної петлі), збільшився: на спектрі темна похила деталь зсунулася в довгохвильову сторону і значно збільшилась у розмірі. Вона змістилася в область БЕ, перетнула ядро лінії і частково перекрила червоне крило. Тобто, в цей час магнітне поле над БЕ мало спіралеподібну структуру. На кривій A2 (рис. 5б) викиди 7 і 5 не розділяються. Центральна частина і синє крило профілів в цьому місці спектру спочатку зміщені у короткохвильовий бік, а середня частина червоного крила — у довгохвильовий бік відносно профілю L2. Поступово весь профіль змістився в червоний бік спектру і через накладення профілю викиду став дуже широким — його півширина дорівнювала $\lambda_{1/2} = 0.18$ нм, він був майже в два рази ширшим від профілю для незбуреної хромосфери (0.086 нм). Крива 7 на рис. 5г свідчить про зміну променевої швидкості від -9.4 км/с до 15.7 км/с, вказуючи на те, що висхідний рух речовини поступово уповільнився і змінився на низхідний.

У петлі 5 висхідний рух речовини теж змінився на низхідний з $V_{\text{пр}} = 40$ км/с. Сержу 5 відповідає зменшення інтенсивності на кривих A2 і B2 на рис. 5б на фоні підвищеної інтенсивності, що відповідає БЕ. У профілів сильна червона асиметрія і вони дуже широкі: $\lambda_{1/2} = 0.21$ нм. Профіль 5 на рис. 5в складається з основного профілю і профілю 5-го сержу, який проектується на червоне крило лінії.

Викид 8 розвивався з іншого боку області БЕ. Його видно на кривій A1 (рис. 5б). В ньому вздовж поперечного розрізу швидкість низхідного руху повільно зменшувалась від 18.4 до 9 км/с, з боку БЕ вона була більшою. Червоне крило профілів поступово зсувалося до червоного крила профілю L2, а центральна частина — в синій бік спектру.

Рис. 6 показує, як визначалась швидкість хромосферної речовини у струменях сержів, профілі яких проектувались на внутрішню частину крила лінії H, і їхню центральну частину неможливо було чітко виділити, щоб отримати величину зсуву відносно профілю пр-L2 незбуреної хромосфери. Від I-профілю Стокса лінії H, отриманого зі спектру (для прикладу взято один із профілів струменя 7) віднімався профіль для незбуреної хромосфери (пр-L2). На кривій різниці між цими профілями (крива 7б) чітко видно місця центральних частин профілів струменів з висхідним і низхідним рухом хромосферної речовини.

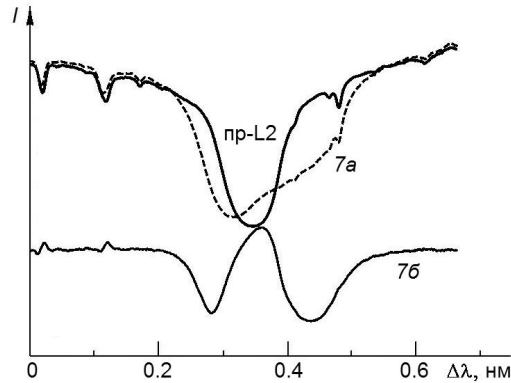


Рис. 6. Профіль 7а лінії Н для струменя 7 (7б — цей же профіль після вирахування профілю для незбуреної хромосфери)

Спектр 320. Спектр 320 було отримано о 10:07:42 UT під час другого піку збільшення інтенсивності на світловій кривій БЕ у спалаховій фазі її розвитку, через $1^m 10^s$ після попереднього (рис. 2). На спектрі Н-викиди видно як в синьому, так і в червоному крилі лінії (рис. 6а). У ядрі лінії, як і на попередньому спектрі, над порами видно світлу смугу — флокул. На висоті формування ядра лінії променева швидкість хромосферної речовини в цьому місці становила $-2...4$ км/с (крива 1 на рис. 7г). На ділянці спектру між порою і БЕ відбувся поступовий перехід темних деталей (сержі) з синього крила лінії в червоне, тобто у викидах рух хромосферної речовини угору змінився на рух вниз. При цьому на частині ділянки АО біля пори спостерігався переважно висхідний рух хромосферної речовини, а в частині ділянки біля БЕ переважав низхідний рух речовини.

Як і у попередній момент спостережень, серж 2 складався з двох струменів 2г і 2д, які проєктувалися на ядро і синє крило лінії Н (рис. 7а). За 70 с, які пройшли між отриманням спектрів 295 і 320, у струмені 2г частина потоку продовжувала рухатися вгору, а частина потоку змінила напрямок руху. На одному краю поперечного розрізу $V_{пр}$ становила -12 км/с, яка поступово вздовж розрізу зменшувалась, а на іншому боці (біля пори) речовина вже рухалася вниз з невеликою швидкістю до 2.2 км/с (рис. 7з). Швидкість руху вгору струменя 2д за цей час зменшилася вдвічі. В середній частині потоку вона становила -49 км/с, а на краях поперечного розрізу була меншою — близько -35 км/с. Подібні зміни швидкості у сержі, який супроводжував БЕ, знайдено в роботі [38]. Було виявлено, що швидкість струменя при першій появі становила -84 км/с, а через 90 с зменшилась приблизно до -60 км/с. Зроблено висновок, що зменшення швидкості могло бути пов'язане з гравітацією, що уповільнює струмінь з часом.

У магнітній петлі 3 в цей час спостерігались два струмені з протилежним рухом речовини — на спектрі їх видно в обох крилах лінії Н. Їхні профілі проєктувалися на синє і червоне крило лінії (профіль 3 на

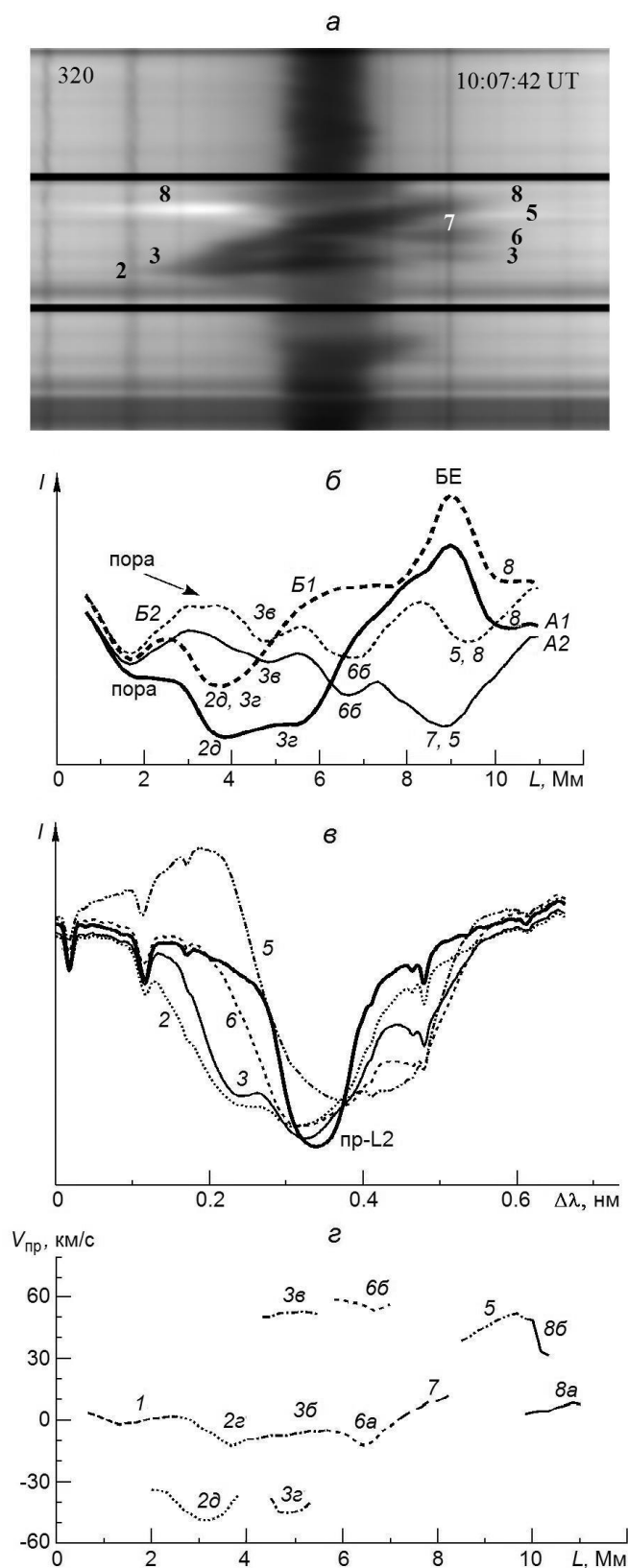


Рис. 7. Те саме, що й на рис. 3, але для спектру 320

рис. 7в). З'явився новий струмінь 3г з висхідним рухом плазми, швидкість $V_{\text{пр}}$ становила -45 км/с в його середній частині і -40 і -38 км/с — по краях. Струмінь 3в, який рухався донизу, став вужчим, але більш інтенсивним. Швидкість руху в ньому вздовж поперечного розрізу майже не змінилась і була близькою до 52 км/с. На рис. 6б на кривій $A1$ видно невелике зменшення інтенсивності, що відповідає струменю 3г, але на кривій $B1$ струмені 2д і 3г не розділяються, на кривих $A2$ і $B2$ добре видно положення струменя 3в. Швидкість висхідного руху речовини у струмені 3б зменшилась до цього часу, і вздовж його поперечного розрізу змінювалась між -4.4 і -9.0 км/с.

Як і у попередній момент спостережень, серж 6 складався з двох струменів хромосферної речовини 6а і 6б, їх видно в ядрі і червоному крилі лінії H . У струмені 6а зменшилась швидкість руху, на одному боці поперечного розрізу — до -4 км/с, а з іншого боку речовина навіть змінила напрямок руху до $V_{\text{пр}} = 0.4$ км/с. У середній частині струменя швидкість не змінилась і була близькою до -12 км/с. Струмінь 6б, з низхідним рухом речовини, розширився і став менш інтенсивним. Він добре виділяється на кривих $A2$ і $B2$ (рис. 7б), його профіль проєктується на червоне крило лінії H (профіль 6 на рис. 7в). Крива зміни $V_{\text{пр}}$ вздовж його поперечного розрізу складалася з кількох відрізків, швидкість речовини збільшилась і змінювалась між 54 і 59 км/с.

Вихровий рух в магнітній петлі 7 спостерігався протягом близько 3 хв, поступово зменшуючись. Хромосферна речовина сержу 7 повністю змінила напрямок руху, і в цей час в ньому спостерігався низхідний потік, в якому вздовж поперечного розрізу $V_{\text{пр}}$ збільшувалась у бік області БЕ від 0.4 до 13.8 км/с.

На кривій $A2$ неможливо розділити сержі 5 і 7, але зниження інтенсивності, яке відповідає сержам 5 і 8, добре видно на кривих $B2$ і $A1$ відповідно. Серж 5 в цей час складався з кількох струменів. Їхні профілі проєктуються на червоне крило лінії, вони стали дуже широкими. Півширина найширшого профілю, який приведено на рис 7в, дорівнює 0.227 нм, вона була в 2.6 раза більшою від півширини профілю для незбуреної хромосфери. Променева швидкість вздовж поперечного розрізу сержа змінювалась між 32 і 53 км/с.

Серж 8 складався з двох струменів: 8а і 8б. На спектрі темна дельта, що відповідає струменю 8а, перекриває ядро лінії H і зсунута на невелику відстань в її червоне і синє крило. Зниження інтенсивності відбулось на кривих $A1$ і $B1$ (рис. 7б). У середній частині профілів спостерігалася як синя, так і червона асиметрія, але їхня центральна частина була зсунута у червоний бік спектру. Ймовірно, це означає, що у струмені 8а спостерігалися як висхідний, так і низхідний потік плазми з невеликою швидкістю, але на рівні утворення ядра лінії речовина рухалася вниз. Рис. 7г показує, що струмінь був дуже структурованим, його променева швидкість зменшилась від попереднього моменту, і вздовж поперечного розрізу змінювалась від 3 до 9 км/с. Струмінь 8б з

низхідним рухом зі швидкістю близько 50 км/с утворився після першого піку яскравості БЕ у її спалаховій фазі. Чітко видно його стало на спектрі 305 (10:07 UT). За час, що пройшов між спектрами 305 і 320, швидкість $V_{\text{пр}}$ в ньому зменшилася до 32 км/с на боці, дальшому від БЕ, і змінювалась вздовж поперечного розрізу між 50 і 32 км/с.

Спектр 380 було отримано о 10:10:32 UT через $2^m 50^s$ після попереднього під час 5-го найвищого піку інтенсивності на світловій кривій БЕ. За цей час спостерігалися ще два піки підвищення яскравості бомби Еллермана. Вид спектру значно змінився — лінія Н стала дуже волокнистою, але більш симетричною. В обох її крилах видно викиди, але зсув темних деталей від ядра лінії в червоному крилі більший, ніж в синьому — низхідні потоки в сержах рухалися з більшою швидкістю, ніж висхідні. Як і на попередніх спектрах, в ядрі лінії Н над порами видно світлу полосу — флокул. В цьому місці на рівні утворення ядра лінії Н речовина рухалася вгору з невеликою швидкістю $-0.3 \dots -4.5$ км/с (крива 1, рис. 8г).

У магнітній петлі 1 одночасно утворилися два струмені з протилежним напрямком руху. Їх добре видно в обох крилах лінії Н. Ймовірно, це свідчило про те, що в цьому місці відбулося магнітне перез'єднання. У струмені 1б з висхідним рухом речовини і у струмені 1в, в якому речовина рухалася донизу, швидкість $V_{\text{пр}}$ вздовж поперечного розрізу зменшувалась у бік пори від -36 до -31 км/с і від 65 до 59 км/с відповідно.

Серж 2 розширився і став дуже волокнистим — він складався з багатьох невеликих струменів, які добре видно на спектрі (рис. 8а). Швидкість висхідного потоку 2д за час між спектрами 320 і 380 ще зменшилась, і вздовж його поперечного розрізу змінювалась від -11.4 до -16.7 км/с. На рис. 8г видно, що крива 2д складається з кількох відрізків, це вказує на тонку структуру струменя — він складався з менших струменів, які рухалися з різними швидкостями. Поряд з висхідним потоком почав формуватися низхідний потік 2ж, швидкість $V_{\text{пр}}$ в ньому змінювалась між 8 і 11 км/с. На спектрі темна деталь з'явилася в червоному крилі лінії Н. Добре видно зменшення інтенсивності на кривих А2 і В2 (рис. 8б). Ймовірно, частина речовини потоку досягла певної висоти і під дією гравітації почала опускатися по траєкторії, близькій до тої, якою вона підіймалася. Профілі лінії Н стали дуже широкими (рис. 8в) — їхня півширина $_{1/2}$ збільшилась до 0.2 нм. До кінця спостережень швидкість потоку вниз збільшувалась, також збільшувався простір, який він займав, тобто все більша частина потоку поступово змінювала напрямок руху на протилежний [1].

Хромосферний викид 3 в цей час складався з трьох струменів, які добре видно на спектрі і на профілі 3. У струмені 3г речовина рухалася вгору, а у струменях 3б і 3в спостерігався низхідний рух. Порівняно з попереднім моментом спостережень струмінь 3в розширився і став менш інтенсивним, швидкість $V_{\text{пр}}$ в ньому збільшилася, і вздовж попе-

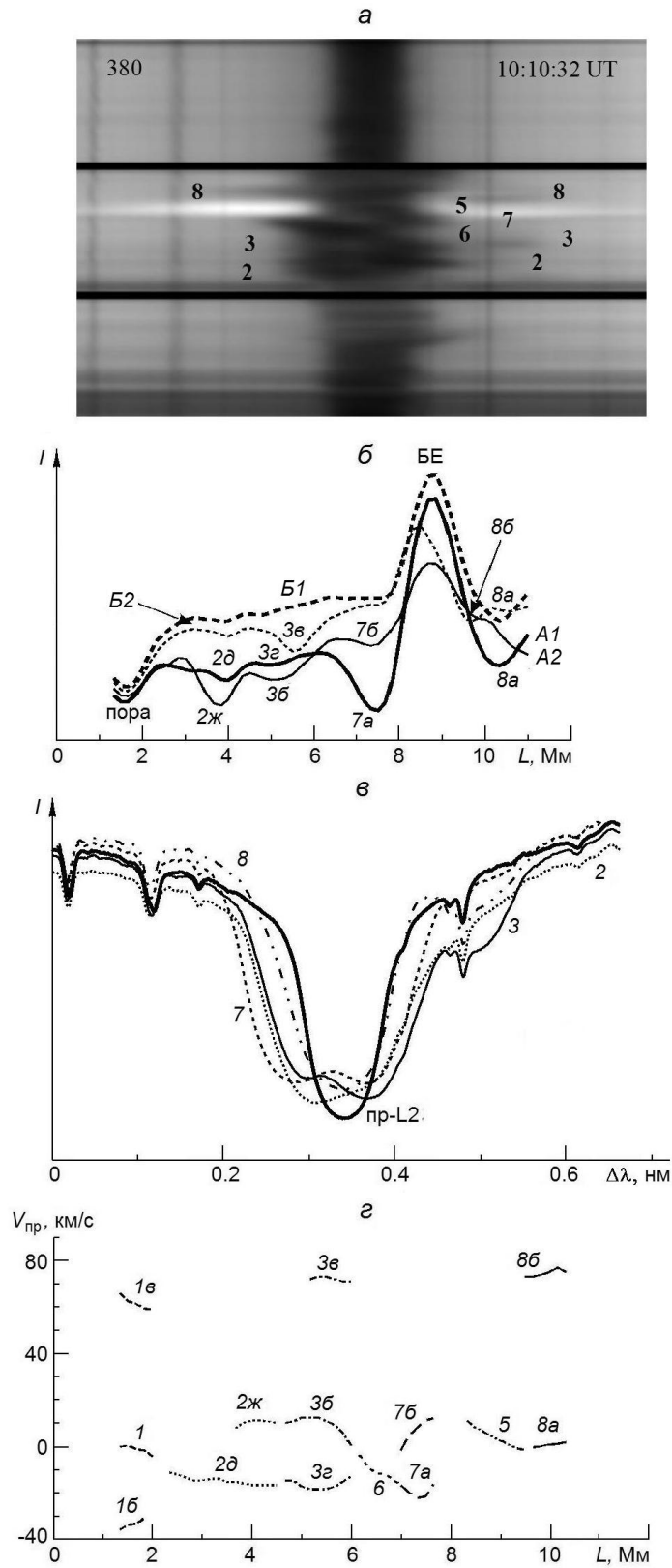


Рис. 8. Те саме, що й на рис. 3, але для спектру 380

речного розрізу змінювалась між 71 і 73 км/с. Центральна частина профілю 3 складалася з профілів струменів 3б і 3г. Напрямок руху у струмені 3б змінився на протилежний. Променева швидкість в його центральній частині дорівнювала 12.5 км/с, на краях поперечного розрізу струменя речовина рухалася зі швидкістю 10 і 0.3 км/с, при цьому більша швидкість спостерігалася з боку пори. Наприкінці спостережень у магнітній петлі 3 рухалися два струмені у протилежних напрямках. У струмені з висхідним рухом речовини швидкість $V_{\text{пр}}$ була близькою до -16 км/с, а з низхідним — приблизно 17 км/с.

У магнітній петлі 6 в цей час на рівні утворення ядра лінії H спостерігався струмінь з висхідним рухом речовини, швидкість $V_{\text{пр}}$ в ньому вздовж поперечного розрізу зростала від -4 до -17 км/с. Струмінь 6б за час, що пройшов між спектрами 320 і 380, припинив своє існування — на спектрах він ставав все ширшим та менш інтенсивним і врешті зник. Ймовірно, він розпався на дрібні елементи. Наприкінці спостережень в цьому місці спостерігався висхідний рух речовини, променева швидкість якого була близькою до -16 км/с.

У магнітній петлі 7, ймовірно в результаті Perez'єднання, утворилися два нові потоки з протилежним напрямком руху плазми. Струмені 7а і 7б з висхідним і низхідним рухом речовини добре видно на кривих A1 і A2 відповідно. У центральній частині струменя 7а речовина рухалася вгору з $V_{\text{пр}} = -22$ км/с, на краях поперечного розрізу вона була меншою і була близькою до -17 км/с. У струмені 7б спостерігався переважно низхідний рух, швидкість $V_{\text{пр}}$ якого вздовж поперечного розрізу змінила напрямок і збільшувалася від -2 до 12 км/с.

На рис. 8в видно, що центральні частини профілів 3 і 7 складаються з двох компонентів (профілів двох струменів) центральні частини яких зміщені у протилежні сторони відносно профілю для незбуреної хромосфери (пр-L2). При цьому профіль для висхідного потоку зміщений в синю сторону спектра, а для низхідного — в червону, вказуючи на наявність поряд двох різноспрямованих потоків речовини. Такого виду профілі були отримані в роботі [50] при спектроскопічному дослідженні двох гомологічних сержів. Автори назвали їх двопелюстковими і зробили висновок, що розширені та двопелюсткові профілі H відстежують прискорені або уповільнені потоки холодної плазми, що примикають один до одного, в багатопотоковій структурі сержа.

На спектрі темну деталь, що відповідала сержу 5, видно в ядрі лінії H, тому на кривих рис. 8б її не відмічено. У сержі спостерігався переважно низхідний рух речовини. З одного боку поперечного розрізу невелика частина потоку ще рухалася вгору зі швидкістю близько -2 км/с, далі вздовж розрізу напрямок руху змінився, і речовина почала рухатися вниз зі швидкістю, що збільшилась до $V_{\text{пр}} = 11$ км/с.

У магнітній петлі 8 низхідний рух струменя 8а сповільнився, і зміни $V_{\text{пр}}$ в ньому не перевищували 1.7 км/с. Струмінь 8б видно в червоному крилі спектру і на кривій B2 (рис. 8б). Величина і інтенсив-

ність струменя зменшились, а його швидкість різко зросла і сягала 77 км/с. Рис. 8г показує, що він складався з двох менших струменів. Вздовж поперечного розрізу швидкість $V_{\text{пр}}$ в них змінювалася від 73 до 75 км/с і від 77 до 75 км/с. До кінця спостережень струмів 8б став ще менш інтенсивним, але дуже збільшився у розмірі.

У період спалахової фази розвитку БЕ спектри і профілі лінії Н дуже швидко змінювалися. Лінія Н стала дуже волокнистою, і розподіл швидкості вздовж поперечного розрізу викиду став сильно структурованим. Всі сержі складалися з кількох струменів. Якщо раніше сержі спостерігалися переважно в синьому крилі лінії Н — речовина в них рухалася вгору, то на спектрах, отриманих за цей час, їх видно також і у червоному крилі лінії. Ймовірно, речовина викидів досягла певної висоти або вершин магнітних петель, по яких вона підіймалася, і під дією гравітації почала рухатися донизу. Збільшилися площі, які займали сержі, стало важко виділяти межі між ними, тому що їхні деталі почали перекривати одна одну. З'явилися дуже розширені і двопелюсткові профілі, вказуючи на наявність струменів з різноспрямованим рухом речовини, які примикали один до одного.

Було досліджено також, як змінювалися променеві швидкості та напрямок руху хромосферної речовини уздовж досліджуваної ділянки АО на рівні утворення ядра лінії Н за час наших спостережень. На рис. 9 представлено зміни $V_{\text{пр}}$ уздовж ділянки АО, вирізаної щілиною спектрографа, в різні моменти спостережень. Положення пори і бомби Еллермана позначено вертикальними лініями. На спектрах видно, що на початку спостережень тільки деякі ділянки ядра лінії перекрито темними деталями, що відповідають струменям речовини, з яких склалися сержі. На кривих 1 і 2, для моментів спостережень 9:57:19 (100) і 9:58:16 (120), $V_{\text{пр}}$ змінювалась між -14 і 4 км/с, причому максимальний висхідний рух спостерігався в області пори. В області розвитку БЕ і біля неї відбувалися коливання швидкості від 4 до -3 км/с, які ненабагато перевищували $V_{\text{пр}}$ для незбуреної хромосфери. Крива 3 (спектр 175) показує, що приблизно через 3 хв біля пори в цій області хромосфери утворився низхідний потік речовини з $V_{\text{пр}}$ до 13 км/с (струмінь 2б), в середній частині ділянки висхідний потік з максимальною швидкістю $V_{\text{пр}} = -17$ км/с відповідає струменю 3а, і в області БЕ максимальні швидкості -11 і -16 км/с відповідають струменям сержів 4 і 5. Наступні чотири криві отримано для спалахової фази розвитку БЕ. Крива 4 для спектру 295 показує, що тільки над областю БЕ відбувався низхідний рух речовини з швидкістю $V_{\text{пр}} = 22$ км/с. Над порами речовина рухалась з невеликою швидкістю біля ± 1 км/с, а в середній частині ділянки два потоки вгору з максимальною швидкістю -16 і -12 км/с відповідали струменям сержів 3 і 6. На кривій 5 (спектр 340) видно, що в цей момент спостережень, як і у попередній, швидкість руху речовини біля пор не перевищувала ± 1 км/с. У середній частині ділянки на цьому рівні хромосфери спостерігались три висхідних потоки з максимальними швидкостями -19 , -25 і -13 км/с, які відповіда-

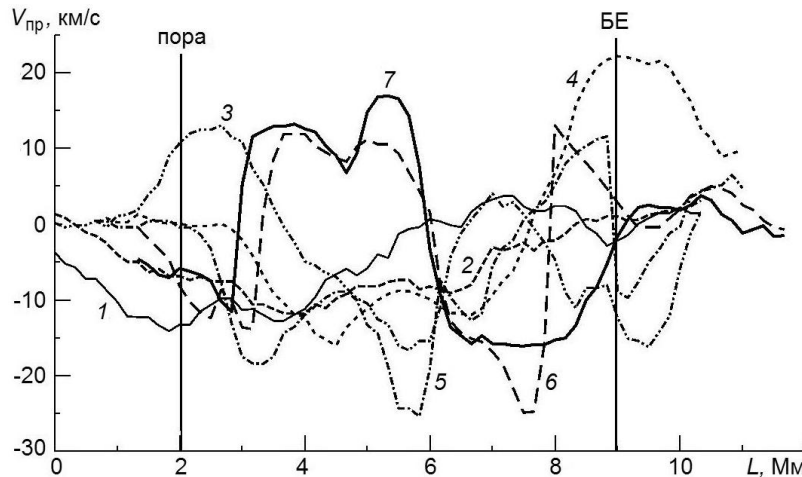


Рис. 9. Зміна хромосферної променевої швидкості уздовж ділянки АО, вирізаної щілиною спектрографа, в різні моменти спостережень: 1 — $9^h57^m18^s$ (спектр № 100), 2 — $9^h58^m16^s$ (120), 3 — $10^h00^m52^s$ (175), 4 — $10^h06^m32^s$ (295), 5 — $10^h08^m39^s$ (340), 6 — $10^h10^m32^s$ (380), 7 — $10^h11^m26^s$ (399) UT. Вертикальні лінії — положення пори і бомби Еллермана. Негативні значення променевої швидкості відповідають руху до спостерігача

ли струменям сержів 2, 6 і 7 відповідно. Над областю БЕ два струмені, які рухались у протилежних напрямках, розміщувались поруч (на відстані близько 160 км), їх добре видно на спектрі. Струмінь з низхідним рухом речовини мав максимальну швидкість близько 12 км/с і належав сержу 5, а струмінь з висхідним рухом належав сержу 8 і мав максимальне значення $V_{пр} = -10$ км/с. Криві 6 і 7 для спектрів 380 і 399, отримані під кінець спостережень, мають ідентичний хід зміни $V_{пр}$. На ділянці області біля пори спостерігалися два низхідних потоки (струмені сержів 2 і 3), максимальні $V_{пр}$ яких змінювались від 9 до 17 км/с. На ділянці біля БЕ і над нею спостерігалися як висхідні, так і низхідні потоки речовини. На кривій 6 негативні швидкості до -25 км/с різко змінилися на позитивні до 13 км/с, це вказує на те, що поряд проходили потоки з різноспрямованим рухом речовини. Наше дослідження показало, що у верхній частині магнітних петель, на рівні утворення ядра лінії H, променева швидкість плазми змінювалась між -25 км/с і 22 км/с.

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ І ВИСНОВКИ

У даній роботі, яка є продовженням роботи [36], на основі аналізу спектральних спостережень ділянки активної області NOAA 11024 ми продовжуємо досліджувати особливості утворення та розвитку дрібномасштабних елементів сонячної активності, таких як бомба Еллермана і хромосферні викиди речовини. Активна область у день наших спостережень перебувала в основній фазі свого розвитку — актив-

ність її різко зростала. Досліджувана ділянка АО (її довжина 10 Мм) була розташована в області одного з магнітних потоків, що в цей час виходили. Це була серія невеликих ділянок зі змішаною полярністю, так зване серпантинове магнітне поле. Під час його виходу із фотосфери в хромосферу утворилася пора, на відстані приблизно 7.2 Мм від неї розвинулась бомба Еллермана і утворилася система аркових волокон (САВ), так звана Arch Filament System. У результаті повторних Perez'єднань між магнітними петлями потоку і наявним навколишнім магнітним полем в них сформувалися викиди хромосферної речовини — сержі.

Спектрополяриметричний матеріал з високою просторовою ($\sim 1''$) і часовою (близько 3 с) роздільними здатностями було отримано О. В. Хоменко 4 липня 2009 року на франко-італійському 90-см телескопі THEMIS (о. Тенеріфе, Іспанія). Спостереження велись одночасно у п'яти ділянках спектру. У роботі використано одну із них, яка містить центральну частину хромосферної лінії H α . Як зазначено в багатьох роботах, лінія H α є важливим діагностичним засобом для дослідження сонячної хромосфери. Час спостережень склав 20 хв ($9^h52^m...10^h11^m$ UT). Було отримано 400 спектрів. У роботі ми використали 36 найбільш якісних.

У першій частині роботи [36] детально вивчено особливості утворення та розвитку бомби Еллермана під час наших спостережень. У даній роботі розглянуто особливості еволюції системи аркових волокон, під якою виникла і розвивалася бомба Еллермана. Досліджено утворення і розвиток усіх H α -викидів у магнітних петлях САВ під час наших спостережень. Потрібно зазначити, що кожен з них мав свої особливості. На всіх спектрах хромосферні викиди видно у поглинанні як у довгохвильовому, так і у короткохвильовому крилі лінії H α .

Досліджено зміни форми I-профілів Стокса лінії H α , які було отримано з інтервалом, що відповідає 160 км на поверхні Сонця. Виявлено, що вони значно відрізняються від профілю для незбуреної хромосфери. В залежності від того, догори чи донизу рухався викид, компонент профілю, що відповідав йому, проєктувався на синє чи червоне крило лінії H α . Інтенсивність цього компонента іноді перевищувала інтенсивність основного компонента. Якщо профіль викиду проєктувався на ядро лінії, відбувалося розширення та викривлення її профілю, зміщення його в червону або синю сторону. У деяких випадках півширина профілю була в 2.3 раза більшою від профілю для незбуреної хромосфери — 0.2 і 0.086 нм відповідно. Під кінець спостережень центральна частина профілю могла складатися з двох компонентів, зміщених у протилежні сторони від ядра профілю лінії для незбуреної хромосфери (двопелюсткові профілі), вказуючи на те, що поруч протікали як низхідний, так і висхідний потоки.

Виявлено, що сержі можуть складатися з кількох струменів, які утворюються під час послідовних і періодичних магнітних Perez'єднань. Було проаналізовано зміни променевої швидкості ($V_{\text{пр}}$) і напрям-

ку руху речовини у викидах, а також як змінювалася $V_{\text{пр}}$ уздовж поперечного розрізу струменів сержів в місці їхньої максимальної інтенсивності. Швидкість струменів була різною і, напевно, залежала від структури магнітного поля у сержі і навколишньому середовищі. Різним був і напрямок руху струменів — він залежав від фази розвитку сержа. Більшість кривих зміни $V_{\text{пр}}$ по поперечному розрізу сержів склалися з кількох відрізків. Це вказує на те, що великі струмені склалися з кількох дрібніших струменів, тобто вони мали волокнисту структуру. Висхідні і низхідні потоки сержа часто виникали одночасно, і збігалися у часі зі збільшенням яскравості БЕ. Це вказує на те, що в цей час відбувалися магнітні перез'єднання, які відповідали за обидва процеси. При цьому на спектрі з'являлися темні деталі як в синьому, так і в червоному крилі лінії H_α. Один з викидів, який утворився поблизу бомби Еллермана, мав ознаки вихрових рухів плазми, про що свідчать похилі темні смуги у спектрах. З часом їхній нахил зменшився. Вихровий рух спостерігався протягом близько 3 хв. На момент найбільшої яскравості БЕ на досліджуваній ділянці АО спостерігалися сім сержів, причому у трьох із них плазма опускалася зі швидкістю до 77 км/с, а п'яти — підіймалася з набагато меншою швидкістю до -35 км/с. Було виявлено, що під час наших спостережень максимальна швидкість руху плазми вгору у H_α-сержах досягла -110 км/с, а вниз — до 90 км/с. У верхній частині магнітних петель швидкість плазми змінювалась між -25 км/с і 22 км/с. Значення швидкості на ділянці без активних утворень не перевищували ±2 км/с.

Також проаналізовано, чи пов'язані процеси еволюції САВ та фази розвитку БЕ. У період першої фази (попереднього нагрівання) розвитку бомби Еллермана найзначніші зміни на ділянці АО відбулися під час 2-го піку підвищення яскравості БЕ (10:00:52 UT, спектр 175). В результаті магнітних перез'єднань утворилися нові струмені у магнітних петлях 2 і 3; біля області розвитку БЕ спливали дві нові петлі; виник хромосферний викид з обертальним рухом; біля вже наявної пори почала розвиватись нова пора.

У період спалахової фази розвитку БЕ спектри і профілі лінії H_α дуже швидко змінювалися. Лінія H_α стала дуже волокнистою, і розподіл швидкості вздовж поперечного розрізу викиду став сильно структурованим. Усі сержі склалися з кількох струменів. Якщо раніше сержі спостерігалися переважно в синьому крилі лінії H_α — речовина в них рухалася вгору, то на спектрах отриманих за цей час їх видно також і у червоному крилі лінії. Ймовірно, речовина викидів досягла певної висоти або вершин магнітних петель, по яких вона підіймалася, і під дією гравітації почала рухатися донизу. Під час другого піку збільшення інтенсивності на світловій кривій БЕ (спектр 320) у спалаховій фазі її розвитку на частині ділянки АО біля пори спостерігався переважно висхідний рух хромосферної речовини, а на частині ділянки біля БЕ переважав низхідний рух речовини. Під кінець спостережень збільшилися площі, які займали сержі, стало важко

виділяти межі між ними тому що їхні деталі почали перекривати одна одну. З'явилися дуже розширені і двопелюсткові профілі — спостерігалися струмені з різноспрямованим рухом речовини, що примикають один до одного. Низхідні потоки в сержах рухалися з більшою променевою швидкістю, ніж висхідні.

Наша робота основана на детальному дослідженні спостережних даних, які було отримано з високою просторовою і часовою роздільною здатністю, це дозволило краще зрозуміти динаміку еволюції системи аркових волокон, під якою виникла і розвивалася бомба Еллермана, а також виявити особливості утворення і розвитку сержів, які формувалися в її магнітних петлях. Ймовірно, вони були результатом послідовних і періодичних магнітних перез'єднань, які були пов'язані з виходом нового змієподібного магнітного потоку і відбувалися при взаємодії його петель з навколишнім уже наявним магнітним полем АО, або між магнітними петлями самого потоку.

Автор висловлює подяку О. В. Хоменко і Р. І. Костику за матеріали спостережень на франко-італійському 90 см вакуумному телескопі THEMIS Інституту астрофізики на Канарських островах і програми з їхньої обробки.

REFERENCES

1. Pasechnik M. M. (2021) Study of the connection between Ellerman bomb and H α -surges. *Visn. Kyiv. Univ. Astron.* 64(2). 5—12. [In Ukrainian].
2. Archontis V., Moreno-Insertis F., Galsgaard, et al. (2004) 3D MHD Simulations on magnetic flux emergence. *Astron. and Astrophys.* 426. 1047—1063
3. Balthasar H., Gömöry P., González Manrique, et al. (2018) Spectropolarimetric observations of an arch filament system with GREGOR *eprint arXiv:1804.01789*.
4. Bong S.-Ch., Cho K.-S., Yurchyshyn V. (2014) Kinematics of solar chromospheric surges of AR 10930. *J. Korean Astron. Soc.* 47(6). 311—317.
5. Bruzek A. (1967) On arch-filament systems in spot groups. *Solar Phys.* 2(4). 451—461.
6. Bruzek A. (1968) Bright points (moustaches) and arch filaments in young active regions. *IAU Sympos.* N 35. 293—298.
7. Bruzek A. (1969) Motions in arch filament systems. *Solar Phys.* 8(1). 29—36.
8. Canfield R. C., Reardon K. P., Leka K. D., et al. (1996) H α surges and X-ray jets in AR 7260. *Astrophys. J.* 464. 1016—1029.
9. Chen H. D., Jiang Y. C., Ma S. L. (2008) Observations of H α surges and ultraviolet jets above satellite sunspots. *Astron. and Astrophys.* 478. 907—913.
10. Dominguez S. V., van Driel-Gesztelyi L., Bellot Rubio L. R. (2012) Granular-scale elementary flux emergence episodes in a solar active region. *Solar Phys.* 278(1). 99—120.
11. Engell A. J., Siarkowski M., Gryciuk M., et al. (2011) Flares and their underlying magnetic complexity. *Astrophys. J.* 726. 12—20.
12. Emonet T., Moreno-Insertis F. (1998) The physics of twisted magnetic tubes rising in a stratified medium: Two-dimensional results. *Astrophys. J.* 492. 804—821.
13. Fan Y. (2001) The emergence of a twisted α -tube into the solar atmosphere. *Astrophys. J.* 554(1). L111—L114.

14. Fang C., Tang Y. H., Xu Z., et al. (2006) Spectral analysis of Ellerman bombs. *Astrophys. J.* 643. 1325—1336.
15. González Manrique S. J., Bello González N., Denker C. (2017) High-resolution imaging spectroscopy of two micro-pores and an arch filament system in a small emerging-flux region. *Astron. and Astrophys.* 600, id. A38. 14.
16. Gu X. M., Lin J., Li K. J., et al. (1994) Kinematic characteristics of the surge on March 19, 1989. *Astron. and Astrophys.* (ISSN 0004-6361). 282(1). 240—251.
17. Guglielmino S. L., Bellot Rubio L. R., Zuccarello F., et al. (2010) Multiwavelength observations of small-scale reconnection events triggered by magnetic flux emergence in the solar atmosphere. *Astrophys. J.* 724. 1083—1098.
18. Guo J. A., Liu Yu, Zhang H., et al. (2010) Flux rope eruption triggered by jets. *Astrophys. J.* 711(2). 1057—1061.
19. Hood A. W., Archontis V., Galsgaard K., et al. (2009) The emergence of toroidal flux tubes from beneath the solar photosphere. *Astron. and Astrophys.* 503. 999—1011.
20. Iijima H., Yokoyama T. (2017) A Three-dimensional magnetohydrodynamic simulation of the formation of solar chromospheric jets with twisted magnetic field lines. *Astrophys. J.* 848(1). 16 p.
21. Isobe H., Tripathi D., Archontis V. (2007) Ellerman bombs and jets associated with resistive flux emergence. *Astrophys. J. Lett.* 657. L53—L56.
22. Jess D. B., Mathioudakis M., Browning P. K., et al. (2010) Microflare activity driven by forced magnetic reconnection. *Astrophys. J. Lett.* 712. L111—L115.
23. Joshi R., Schmieder B., Aulanier G., et al. (2020) The role of small-scale surface motions in the transfer of twist to a solar jet from a remote stable flux rope *Astron. and Astrophys.* 642. 18.
24. Ju H., Ni Xiang-bin, Fang Ch. (1997) The solar surge of 1982-12-30. *Chin. Astron. and Astrophys.* 21(1). 107—112.
25. Kurokawa H., Kawaguchi I., Funakoshi Y., et al. (1982) Morphological and evolutionary features of Ellerman bombs. *Solar. Phys.* 79. 77—84.
26. Kurokawa H., Sano S. (2000) H surges in emerging flux regions as an evidence of magnetic field reconnection. *Adv. Space Res.* 26(3). 441—444.
27. Liu Yu., Kurokawa H. (2004) On a surge: properties of an emerging flux region. *Astrophys. J.* 610. 1136—1147.
28. Longcop D. W., Fisher G. H., Arendt S. (1996) The evolution and fragmentation of rising magnetic flux tubes. *Astrophys. J.* 464. 999—1011.
29. Madjarska M. S., Doyle J. G., de Pontieu B. (2009) Explosive events associated with a surge. *Astrophys. J.* 701. 253—259.
30. Mandrini C. H., Demoulin P., Schmieder B., et al. (2002) The role of magnetic bald patches in surges and arch filament systems *Astron. and Astrophys.* 391. 317—329.
31. Matsumoto T., Kitai R., Shibata K., et al. (2008) Cooperative observation of Ellerman bombs between the Solar Optical Telescope aboard Hinode and Hida/Domeless Solar Telescope. *Astron. Soc. Japan.* 60. 577—585.
32. Nelson C. J., Doyle J. G., Erdelyi R., et al. (2013) Statistical analysis of small Ellerman bomb events. *Solar. Phys.* 283(2). 307—323.
33. Pariat E., Aulanier G., Schmieder B., et al. (2004) Resistive emergence of undulatory flux tubes. *Astrophys. J.* 614. 1099—1112.
34. Pariat E., Aulanier G., Schmieder B., et al. (2006) Emergence of undulatory magnetic flux tubes by small scale reconnections. *Adv. Space Res.* 38(5). 902—905.
35. Pariat E., Dalmasse K., DeVore C. R., et al. (2016) A model for straight and helical solar jets. II. Parametric study of the plasma beta. *Astron. and Astrophys.* 596. Id. A36. 20.

36. Pasechnik M. N. (2021) Spectral study of the active region with the Ellerman bomb and H α -surges. Chromosphere. Ellerman bomb. *Kinematics and Phys. Celestial Bodies*. 37(1). 1—15.
37. Pasechnik M. N. (2023) Spectral study lower solar atmosphere of the active region site with the Ellerman bomb and accompanying H α -ejections. *Odessa Astron. Publ.* 36. 178—182.
38. Reid A., Mathioudakis M., Scullion E., et al. (2015) Ellerman bombs with jets: cause and effect. *Astrophys. J.* 805(1). Id. 64. 9.
39. Roy J.-R. (1973) The magnetic properties of solar surges. *Solar. Phys.* 28. 95—114.
40. Roy J.-R., Leparskas H. (1973) Some Statistical Properties of Ellerman Bombs. *Solar. Phys.* 30(2). P. 449—457.
41. Roy J.-R. (1973) The dynamics of solar surges. *Solar. Phys.* 32. 139—151.
42. Rust D. M. (1968) Chromospheric Explosions and Satellite Sunspots. Journal: Structure and Development of Solar Active Regions. Symposium no. 35 held in Budapest, Hungary, 4-8 September 1967. IAU Symp. 35, Dordrecht, D. Reidel. 76—83.
43. Shibata K., Nishikawa T., Kitai R., et al. (1982) Numerical hydrodynamics of the jet phenomena in the solar atmosphere — Part Two — Surges. *Solar. Phys.* 77(1-2). 121—151.
44. Spadaro D., Billotta S., Contarino L., et al. (2004) AFS dynamic evolution during the emergence of an active region. *Astron. and Astrophys.* 425. 309—319.
45. Strous L. H., Scharmer G., Tarbell T. D., et al. (1996) Phenomena in an emerging active region. I. Horizontal dynamics. *Astron. and Astrophys.* 306. 947—959.
46. Strous L. H., Zwaan C. (1999) Phenomena in an emerging active region. II. Properties of the dynamic small-scale structure. *Astrophys. J.* 527(1). 435—444.
47. Tandberg-Hanssen E. (1995) The nature of solar prominences. *Astrophys. and Space Science Library* 199, Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
48. Tortosa-Andreu A., Moreno-Insertis F. (2009) Magnetic flux emergence into the solar photosphere and chromosphere. *Astron. and Astrophys.* 507. 949—967.
49. Valori G., Green L. M., Demouli P., et al. (2012) Nonlinear force-free extrapolation of emerging flux with a global twist and serpentine fine structures. *Solar. Phys.* 278(1). 73—97.
50. Verma M., Denker C., Diercke A., et al. (2020) High-resolution spectroscopy of a surge in an emerging flux region. *Astron. and Astrophys.* 639, id.A19. 1—12.
51. Wang J., Zhou T., Ji H. (2014) H α surges initiated by newly-emerging satellite magnetic fields. *Chin. Astron. and Astrophys.* 38(1). 65—74.
52. Watanabe H., Kitai R., Okamoto K., et al. (2008) Spectropolarimetric observation of an emerging flux region: triggering mechanisms of Ellerman bombs. *Astrophys. J.* 684. 736—746.
53. Watanabe H., Vissers G., Kitai R., et al. (2011) Ellerman bombs at high resolution: 1. Morphological evidence for photospheric reconnection. *Astrophys. J.* 736(1). 71—83.
54. Xu A.-a., Ding J.-p., Yin S.-y. (1984) Rotating motion in solar surges. *Chin. Astron. and Astrophys.* 8. 294—298.
55. Yang H., Chae J., Lim E.-K., et al. (2014) Magnetic-reconnection generated shock waves as a driver of solar surges *Astrophys. J. Let.* 790(1). Id. L4, 5.
56. Yang H., Lim E.-K., Iijima H., et al. (2019) Vortex formations and its associated surges in a sunspot light bridge. *Astrophys. J.* 882. 175—186.
57. Yokoyama T., Shibata K. (1996) Numerical simulation of solar coronal X-ray jets based on the magnetic reconnection model. *Astron. Soc. Jap.* 48. 353—376.

58. Zachariadis Th. G., Alissandrakis C. E., Banos G. (1987) Observations of Ellerman bombs in H α . *Solar Phys.* 108(2). 227—236.
59. Zhenghua H., Chaozhou M., Hui F., et al. (2018) A magnetic reconnection event in the solar atmosphere driven by relaxation of a twisted arch filament system. *Astrophys. J. Lett.* 853(2). Id. L26. 8.
60. Zirin H. (1966) *The Solar Atmosphere*, Blaisdell Publ. Co., Massachusetts, U.S.A.
61. Zirin H. (1988) *Astrophysics of the Sun*, Cambridge: Cambridge Univ.
62. Zuccarello F., Guglielmino S. L., Romano P. (2011) Magnetic reconnection signatures in the solar atmosphere: results from multi-wavelength observations. *Mem. S.A.It.* 82. 149—153.

M. N. Pasechnik

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

SPECTRAL STUDY OF ACTIVE REGION SITE WITH ELLERMAN BOMB AND H α -EJECTIONS. CHROMOSPHERE. ARCH FILAMENT SYSTEM

The results of the spectral observation analysis in the H α line of a site of active region NOAA 11024, which was in the main phase of development — its activity increased sharply, are presented. The studied site (its length was 10 Mm) was located in the area of a new serpentine magnetic flow emergence. On it a arch filament system (AFS) was formed, under which the Ellerman bomb (EB) emerged and developed, and a pore formed at a distance of about 7.2 Mm from EB. We study the AFS evolution and investigate the formation and development of all H α -ejections that formed in its magnetic loops during our observations. Spectral data with a high spatial ($\sim 1''$) and temporal (about 3 s) resolution were obtained with Franch-Italian solar telescope THEMIS (Tenerife, Spain) on July 4, 2009. The observation time was 20 minutes (to 9^h52^m — 10^h11^m UT). We used the spectral region that containing the central part of the H α chromospheric line. In all spectra, H α -ejections (surges) were visible in the absorption both in the long-wavelength and in the short-wavelength wing of the line. Changes of the Stokes *I* profiles shape were studied — they were very diverse and significantly different from the profile for the undisturbed chromosphere. Depending on whether the ejection moved to the upward or to the downward, the component of the profile corresponding to it was projected onto the blue or red H α line wing. Towards the end of the observations, significantly broadened and dual-lobed profiles appeared, indicating that both downward and upward plasma flows existed nearby. It was found that surges can consist of several jets that were formed during successive and periodic magnetic reconnections. Doppler shifts of the profile components were used to calculate the line-of-sight velocities (V_{los}) of chromospheric matter in surges. The changes V_{los} along the cross-section of the surge jets at the place of their maximum intensity were analyzed. The V_{los} of jets were different and probably depended on the magnetic field structure in the surge and the surrounding environment. The direction of jet movement was also different — it depended on the phase of surge development. Most of the V_{los} change curves consisted of several segments. This indicates that the large jets were composed of several smaller jets, i.e. they had a fibrous structure. Ascending and descending surge flows often occurred simultaneously, and coincided in time with the increase in EB brightness. A vortex motion of the plasma was observed in the one of the surges for about 3 min, as evidenced by the inclined dark streaks in the spectra. At the moment of the greatest brightness of the EB, there were 7 surges in the studied AR site, and in three of them the plasma moved downwards with V_{los} up to 77 km/s, and in five — it moved upward with a much lower V_{los} , up to -35 km/s. During our observations, the maximum upward velocities chromospheric matter in the surges reached -110 km/s, the downward velocities reached 90 km/s. In the upper part of the magnetic loops the plasma velocities varied between -25 km/s and

22 km/s. The V_{los} values in the site without active formations did not exceed ± 2 km/s. It was also analyzed whether the processes of AFS evolution and EB development phases are related. Our work is based on a detailed study of observational data that was obtained with high spatial and temporal resolution, it allowed us to better understand the dynamics of the evolution of the arch filament system under which the Ellerman bomb emerged and developed, as well as to reveal the features of the formation and development of surges that formed in it magnetic loops. They were probably the result of successive and periodic magnetic reconnections, which were associated with the emergence of a new serpentine magnetic flux and occurred when its loops interacted with the surrounding pre-existing magnetic field AR, or between the magnetic loops of the flux itself.

Key words: Sun, active region, chromosphere, spectra, magnetic reconnection, H α -ejections, line-of-sight velocities.

Стаття надійшла до редакції 12.06.2024

Після доопрацювання 12.06.2024

Прийнята до друку 20.06.2024