

## ДОСЛІДЖЕННЯ ЗВ'ЯЗКУ МІЖ БОМБОЮ ЕЛЛЕРМАНА І $H_{\alpha}$ -СЬОРЖАМИ

На основі аналізу спектральних спостережень у лінії  $H_{\alpha}$  ділянки активної області NOAA 11024, на якій виникла і розвивалася бомба Еллермана і під час спостережень сформувалися різного типу викиди хромосферної речовини, проведено дослідження зв'язку між цими маломасштабними елементами сонячної активності. Спектральні дані з високою просторовою і часовою роздільною здатністю отримано на франко-італійському 90-сантиметровому вакуумному телескопі THEMIS (о. Тенеріфе, Іспанія) 4 липня 2009 р. Час спостережень становив 20 хв.

Ділянка, вибрана для дослідження, містилась в області нового магнітного потоку, що в цей час виходив, і була дуже активною – на ній існувала пора, розвивалася бомба Еллермана (БЕ) і виникло багато хромосферних викидів (сьоржів). Вивчено особливості утворення і розвитку сьоржів, що з'явилися поряд із порою, яка знаходилася на відстані 7,2 Мм від бомби Еллермана. Проаналізовано зміни променевої швидкості ( $V_{\text{пром}}$ ) і напрямку руху хромосферної речовини у  $H_{\alpha}$ -сьоржах. Під час наших спостережень максимальна швидкість руху плазми вгору досягла – 95 км/с, а вниз становила 80 км/с. У верхній частині магнітних петель  $V_{\text{пром}}$  плазми змінювалась між – 20 км/с і 15 км/с. Значення швидкості на ділянці без активних утворень не перевищували  $\pm 2$  км/с. Розподіл швидкостей у середині  $H_{\alpha}$ -сьоржів показав, що в основному вони мали тонку структуру – складалися з декількох струменів. У більшості випадків висхідні й низхідні потоки плазми з'являлися одночасно зі збільшенням яскравості БЕ.

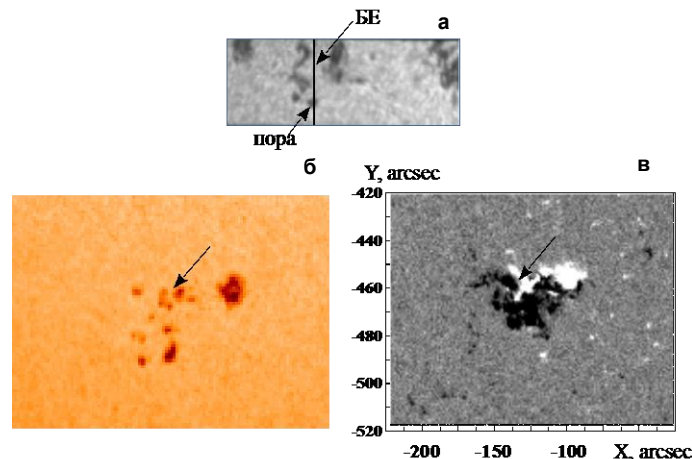
У нашому дослідженні показано, що під час різкого підвищення яскравості БЕ зростала швидкість руху хромосферної речовини у сьоржах, відбувалися зміни напрямку її руху, утворювалися нові сьоржі. Імовірно, за ці процеси відповідали магнітні перез'єднання, що в цей час відбувалися, і які були викликані виходом нового змісподібного магнітного потоку. А також указано на зв'язок  $H_{\alpha}$ -сьоржів, що розвивалися біля пори, з бомбою Еллермана.

**Ключові слова:** активна область, магнітний потік, магнітні перез'єднання, бомба Еллермана,  $H_{\alpha}$ -викиди.

**Вступ.** Спостереження показують, що такі дрібномасштабні енергетичні явища, як бомби Еллермана (БЕ) та викиди хромосферної речовини ( $H_{\alpha}$ -викиди), виникають переважно в молодих активних областях (АО), що розвиваються. Помічено, що  $H_{\alpha}$ -викиди з'являються на найбільш ранній стадії виходу нового магнітного потоку в АО і є першим проявом активності у його взаємодії з уже існуючим навколишнім магнітним полем [6]. У більшості робіт, присвячених вивченню механізму утворення БЕ та  $H_{\alpha}$ -викидів, зроблено висновок, що вони виникають унаслідок процесів магнітних перез'єднань, які відбуваються на малій висоті в атмосфері Сонця [4, 7, 10, 17]. При цьому частина накопиченої магнітної енергії перетворюється на тепло, а частина – на кінетичну енергію. Для розуміння природи цих цікавих високодинамічних явищ важливо детально досліджувати їхнє утворення та розвиток, а також зв'язок між ними [9, 12]. У роботі [3] виявлено, що між окремими хромосферними структурами (зокрема і віддаленими на значні відстані) існують просторово-часові зв'язки. Зв'язок між БЕ та  $H_{\alpha}$ -викадами помічено давно [14] і розглянуто в роботах [8, 12, 18].

Викиди хромосферної речовини виглядають на диску як темні (сьоржі – surge), так і яскраві утворення (джети – jet). Сьоржі – це маломасштабні виверження холодної речовини в сонячній атмосфері, які зазвичай спостерігаються у хромосферних лініях, таких як  $H_{\alpha}$  [19].  $H_{\alpha}$ -викиди бувають або прями, або мають злегка вигнуту форму. Траєкторії сьоржів відповідають магнітним силовим лініям. Оскільки їхня динаміка є рухом плазми вздовж силових ліній магнітного поля, сьоржі корисні для вивчення структури магнітного поля і її зміни [1, 13]. Проте деталі механізму руху сьоржів ще повністю не вивчено.

**Спостережний матеріал.** Для дослідження зв'язку між БЕ і  $H_{\alpha}$ -викадами обрано ділянку АО з високою активністю, на якій виникла і розвивалася бомба Еллермана і під час спостережень сформувалися різного типу викиди хромосферної речовини. Ця ділянка містилась в області нового магнітного потоку, що в цей час виходив [15]. Відомо, що вихід нового магнітного потоку супроводжується такими маломасштабними подіями в сонячній атмосфері, як бомби Еллермана і  $H_{\alpha}$ -викиди. На рис. 1 показано досліджувану ділянку АО із зазначенням положення щілини спектрографа, яка перетинала БЕ та пору (а), а також зображення Сонця в білому світлі, отримане 4 липня 2009 р. о 11:12 UT (б), і магнітограму АО за даними SOHO/MDI, отриману о 9:36 UT в день спостережень (в). Довжина ділянки становила 10,2 Мм.



**Рис. 1.** а – ділянка активної області NOAA 11024, яку ми досліджували, вертикальна лінія – положення щілини спектрографа; б – зображення Сонця в білому світлі, отримане 4 липня 2009 р. о 11:12 UT; в – магнітограма АО отримана SOHO/MDI о 9:36 UT в день спостережень, позитивну і негативну полярності позначено відповідно білим і чорним кольором.  
На рис. 1, б і в, в стрілку показано досліджувану ділянку

У роботі використано спектральні дані з високою просторовою (~ 1") та часовою роздільною здатністю, отримані О. В. Хоменко на франко-італійському сонячному телескопі THEMIS (о. Тенеріфе, Іспанія) 4 липня 2009 р. Під час спостережень за 20 хв (09:52:36 – 10:11:26 UT) отримано 400 спектрів із часовим інтервалом ~ 3 с. Ми використали 36 із них найкращої якості. У попередній роботі [5] детально описано застосований нами спектральний матеріал.

На рис. 2 зображено  $H\alpha$ -спектри, які отримано в різні моменти спостереження. На спектрах указано номер спектра і час, коли він був отриманий, положення бомби Еллермана, пори, а також L1 – ділянки АО, яку ми досліджували, L2 – ділянки АО без активних утворень і яка знаходилася поза областю виходу магнітного потоку. Наявність спектра цієї ділянки дало нам можливість вивчити зміни, які відбувалися в сонячній атмосфері на ділянці L1 під дією бомби Еллермана, і хромосферних викидів. На всіх спектрах  $H\alpha$ -викиди видно в поглинанні як у довгохвильовому, так і в короткохвильовому крилі лінії  $H\alpha$ .

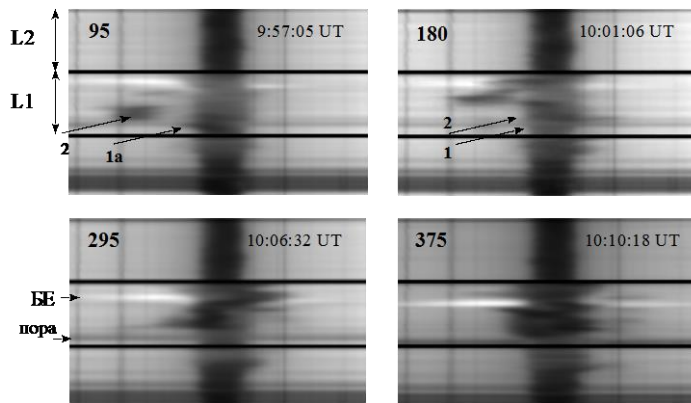


Рис. 2.  $H\alpha$ -спектри АО, отримані в різні моменти спостереження (вказано номер спектра і час, коли він був отриманий); БЕ – бомба Еллермана; стрілками і цифрами 1 і 2 позначено  $H\alpha$ -викиди; L1 – ділянка АО, яку ми досліджуємо; L2 – ділянка АО без активних утворень і яка знаходилася поза областю виходу магнітних потоків

За спектрами отримано Стокс I профілі лінії  $H\alpha$ , з інтервалом, відповідним 160 км на поверхні Сонця. На рис. 3 зображено приклади профілів. Залежно від того догори або донизу рухався викид, компонента профілю, що відповідала йому, проєктувалася на синє (профіль 2) або червоне крило лінії  $H\alpha$  (профіль 3). У центральній частині профілю 4 видно дві компоненти, ядра яких зміщені у протилежні сторони від ядра профілю лінії для ділянки L2 (профіль 1), що вказує на те, що в цьому місці поруч існували як низхідний, так і висхідний потоки. Ширина ділянки спектра, що включає лінію  $H\alpha$ , становила близько 0,6 нм.

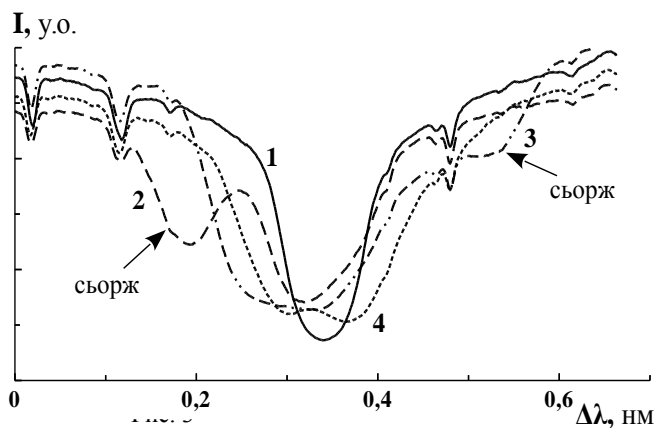


Рис. 3. Приклади профілів лінії  $H\alpha$  (інтенсивність I дано в умовних одиницях) для різних моментів спостережень: профілі 2–4 для 09:57:46, 10:08:39, 10:11:00 UT, профіль 1 наведено для порівняння, він отриманий по спектру ділянки L2

За доплерівськими зсувами цих компонент, щодо положення ядра лінії  $H\alpha$  в лабораторному спектрі, розраховано променеві швидкості ( $V_{\text{пром}}$ ) руху хромосферної речовини у викидах. Враховували всі необхідні поправки: за обертання Землі навколо своєї осі і навколо Сонця, обертання Сонця і гравітаційне зміщення. Значення швидкості на ділянці L2 без активних утворень не перевищували  $\pm 2$  км/с.

**Особливості розвитку бомби Еллермана.** У роботі [11] детально описано особливості розвитку бомби Еллермана під час наших спостережень. Досліджено часові варіації інтенсивності у крилах лінії  $H\alpha$  в області БЕ (світлові криві БЕ) на відстанях  $\pm 0,16$  та  $\pm 0,1$  нм від центра лінії (Fig. 5 [11]). Яскравість емісійних смуг змінювалася від спектра до спектра, однак більш інтенсивним на всіх спектрах, як і в більшості БЕ, було короткохвильове крило. На отриманих нами світлових кривих БЕ виділено два періоди. Перший період, протягом якого інтенсивність змінювалася мало, тривав близько 8 хв. Він складався з 3 піків інтенсивності із часовим інтервалом 1 хв 45 с. Другий період тривав близько 6 хв, протягом якого яскравість БЕ збільшувалася, складався з 5 піків інтенсивності, які спостерігалися з інтервалом близько 1 хв. Це свідчить про те, що в цей час відбувалися магнітні перез'єднання. Отримані в нашій роботі світлові криві БЕ показують, що ми спостерігали дві фази її еволюції: фазу попереднього нагріву і спалахову (імпульсну) фазу, під час яких відбувалося поступове й імпульсне виділення енергії.

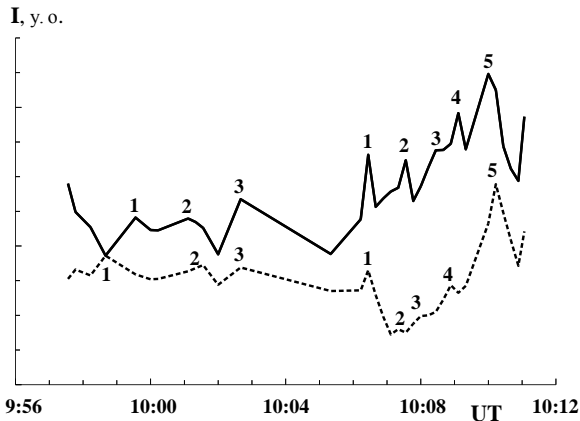


Рис. 4. Зміни із часом інтенсивності емісії у крилах лінії  $H_{\alpha}$  на відстані  $\pm 0,16$  нм від її центра (світлові криві БЕ): у короткохвильовому (суцільна крива) та довгохвильовому (пунктирна крива) крилах; цифрами вказано моменти піків інтенсивності

Таблиця  
Номер піка яскравості БЕ у синьому (а) і червоному (б) крилах лінії  $H_{\alpha}$ ; відповідний їм час спостережень і номер спектра

а	б
<b>Фаза попереднього нагрівання</b>	
1 – 09:59:12 UT (140)	1 – 09:58:16 UT (120)
2 – 10:00:52 UT (175)	2 – 10:01:20 UT (185)
3 – 10:02:31 UT (210)	3 – 10:02:31 UT (210)
<b>Імпульсна фаза</b>	
1 – 10:06:32 UT (295)	1 – 10:06:32 UT (295)
2 – 10:07:42 UT (320)	2 – 10:07:28 UT (315)
3 – 10:08:39 UT (340)	3 – 10:08:11 UT (330)
4 – 10:09:22 UT (355)	4 – 10:09:08 UT (350)
5 – 10:10:18 UT (375)	5 – 10:10:33 UT (380)

На рис. 4 показано часові криві зміни інтенсивності емісії лінії  $H_{\alpha}$  (світлові криві БЕ) у короткохвильовому суцільна крива) та довгохвильовому (пунктирна крива) крилах на відстані  $\pm 0,16$  нм від її центра, цифрами вказано моменти піків інтенсивності. У таблиці зазначено номерів піків яскравості БЕ у синьому (а) і червоному (б) крилах лінії  $H_{\alpha}$  та відповідний їм час спостережень і номер спектра. На рис. 2 зображено спектри 95 і 180, які отримано в моменти піків інтенсивності під час фази попереднього нагрівання і спектри 295 і 375, отримані під час імпульсної фази розвитку БЕ.

#### Променеві швидкості хромосферної речовини у сьоржах.

Перша фаза (попереднього нагрівання) розвитку БЕ. Під час наших спостережень на ділянці АО, яку ми досліджуємо, виникло багато  $H_{\alpha}$ -сьоржів. На першому зі спектрів (95-й, рис. 2), які ми вивчаємо, отриманому у 9:57:05 UT, у короткохвильовому крилі лінії  $H_{\alpha}$  видно 5 сьоржів, що в цей час існували на ділянці L1: викиди 1 і 2 по різні боки біля пори, викиди поряд і над бомбою Еллермана і викид у середній частині ділянки. У цій роботі ми намагатимемося встановити, чи існував зв'язок між бомбою Еллермана, що розвивалася на ділянці АО, і хромосферними викидами, які виникли біля пори. Пора, імовірно, утворилася, коли спливала магнітна петля нового змієподібного магнітного потоку [2]. Вона знаходилася на відстані близько 7,2 Мм від БЕ. Розглянемо детально особливості розвитку сьоржів 1 і 2. На рис. 2 на спектрі 95 їх позначено стрілками.

На спектрі 95 в ядрі і синьому крилі лінії  $H_{\alpha}$  видно викид 1а (рис. 2). Він існував близько 3 хв – спектри 95 (9:57:05 UT) – 155 (9:59:55 UT). Профілі викиду проектувалися на профіль лінії  $H_{\alpha}$ , відбувалося викривлення її профілю, зміщення його в червоний або синій бік спектра. На рис. 5, а показано як змінювалася променева швидкість хромосферної речовини уздовж поперечного розрізу сьоржа 1а в місці його максимальної інтенсивності. Положення пори позначено вертикальною пунктирною лінією. Крива 1 показує розподіл  $V_{\text{пром}}$  у момент спостереження 9:57:05 UT – швидкість підйому змінювалася від  $-7,5$  до  $-13,6$  км/с, максимальною вона була на краю сьоржа біля пори. Криві 2, 3 і 4 вказують на те, що із часом висхідний рух речовини поступово зменшувався. На одному краю викиду  $V_{\text{пром}}$  за 75 с змінилася від  $-7,5$  до  $-1,5$  км/с, а на іншому краю від  $-13,3$  до  $-7$  км/с, тобто швидкість у викиді збільшувалася від одного краю до іншого і була більшою на краю біля пори.

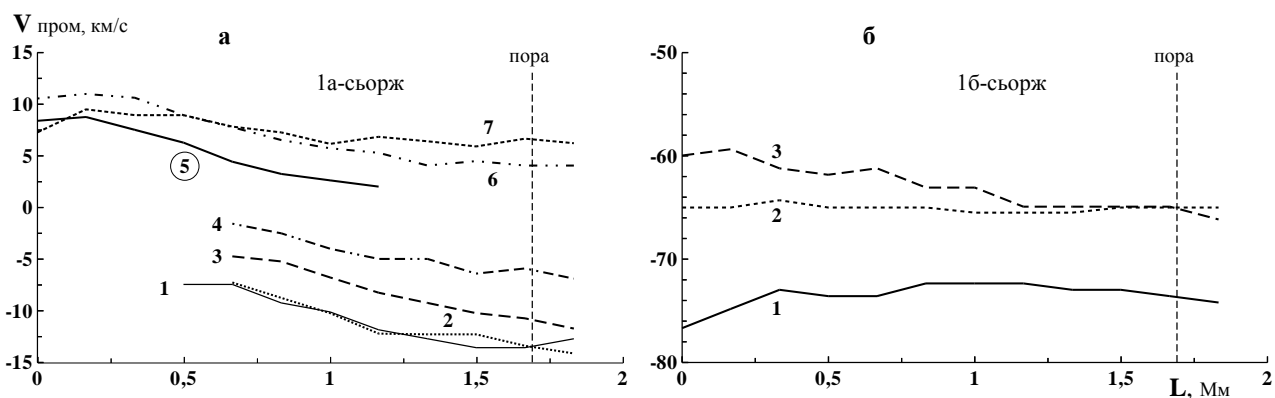


Рис. 5. а – зміни хромосферної променевої швидкості уздовж поперечного розрізу сьоржа 1а в місці його максимальної інтенсивності в різні моменти спостережень у фазі попереднього нагрівання БЕ (у дужках дано номери спектрів): 9:57:05 (95), 9:57:19 (100), 9:57:46 (110), 9:58:16 (120), 9:59:12 (140), 9:59:41 (150), 9:59:55 (155) UT – криві 1–7, відповідно; б – те саме, але для сьоржа 1б, моменти спостережень: 10:00:52 (175), 10:01:06 (180), 10:01:20 (185) UT – криві 1–3, відповідно. Вертикальна пунктирна лінія вказує положення пори. Додатні значення променевої швидкості відповідають руху у напрямку від спостерігача

У момент 9:59:12 UT (спектр 140), коли спостерігався перший пік підвищення яскравості БЕ, що вказує на магнітне перез'єднання, напрямок руху речовини у сьоржі змінився на протилежний (крива 5). І наступні 45 с відбувся низхідний рух плазми зі швидкістю, яка на одному боці викиду зростала від 2 до 7 км/с, а на іншому боці за 30 с збільшилась від 6 до 11 км/с, а потім зменшилась до 8,4 км/с (криві 5, 6 і 7). Імовірно, хромосферна речовина досягла певної висоти магнітної петлі і під дією сили тяжіння почала опускатися по траєкторії, близькій до тієї, якою вона підіймалася. Такий рух речовини спостерігається у зворотних  $H_{\alpha}$ -викидах.

Розглянемо момент 10:00:52 UT (спектр 175), коли спостерігався 2-й пік підвищення яскравості БЕ, у цьому місці з'явився новий викид 1б з великою швидкістю до  $-77$  км/с (рис. 5, б; крива 1), але він існував лише 30 с і коли швидкість зменшилась до приблизно  $-60$  км/с, він зник. Видно, що крива 3 складається з декількох відрізків, це означає, що викид у цей час (10:01:20 UT, спектр 185) мав багатопотокову структуру.

Відомо, що  $H_{\alpha}$ -викид може розвиватися і припинити своє існування двома різними способами: його речовина може поступово зникнути у верхній частині своєї траєкторії після розпаду на дрібні елементи – такий викид 1б, або як у викиді 1а вона може повернутися до поверхні, рухаючись по тій же траєкторії, що і підіймалася, або по петлеподібній траєкторії.

З іншого боку від пори розвивався викид 2а (див. рис. 2, спектр 95 його видно в синьому крилі). У цей момент спостережень у ньому існували два струмені, розташовані поряд. На рис. 6, а видно, що крива 1 складається з двох відрізків різного кольору, вона показує, що висхідна швидкість хромосферної речовини в одному струмені сягала  $-92$  км/с, в другому струмені змінювалась від  $-91$  до  $-88$  км/с. Поступово швидкість зменшувалася і через 75 с вона становила близько  $-50$  км/с (криві 2, 3 і 4 для спектрів 95–120). Змінювався і розмір поперечного перерізу сьоржа – найменшим він був на спектрі 110 (крива 3). На спектрах 95–120 сьорж видно як окрему темну деталь, його профілі добре виділяються в синьому крилі  $H_{\alpha}$ , за їхнім зсувом можна точно визначити  $V_{\text{пром}}$  руху речовини. На спектрі 140 профілі сьоржа вже проєктуються на ядро лінії  $H_{\alpha}$  і трохи на синє крило. Це вказує на те, що речовина викиду 2а досягла верхньої частини петлі. Профілі лінії  $H_{\alpha}$  розширилися і променева швидкість руху плазми у сьоржі визначалася по зсуву ядра лінії  $H_{\alpha}$ . Криві 5, 6 і 7 для спектрів 140, 150 і 155 показують, що хромосферна речовина викиду в цей час рухалася з невеликою швидкістю, причому з одного боку викиду вже спостерігався низхідний потік плазми, в якому  $V_{\text{пром}}$  не перевищувала 4 км/с, а з іншого боку, у висхідному потоці, сягала  $-13$  км/с (крива 7). Тобто у викиді частина речовини почала рухатися донизу. Надалі швидкість низхідного руху збільшувалася. Через хвилину у верхній частині петлі вже вся речовина рухалася донизу – це показують криві 8 і 9 для спектрів 175 і 180. Максимальна швидкість до 13 км/с спостерігалась у середній частині петлі, по боках швидкість була меншою і становила близько 2–4 км/с.

Під час другого піку інтенсивності на світловій кривій БЕ (спектр 175) з'явилися нові  $H_{\alpha}$ -викиди з великими швидкостями до  $-77$  та  $45$  км/с (криві 1а і 1б на рис. 6, б), речовина в яких рухалася у протилежних напрямках. Це вказує на те, що в цей час відбулося магнітне перез'єднання, у результаті якого утворилися висхідний і низхідний потоки. Надалі швидкість руху речовини вгору зменшувалася (криві 2–4 для спектрів 180, 185 і 195). Через хвилину  $V_{\text{пром}}$  висхідного руху становила близько  $-50$  км/с.

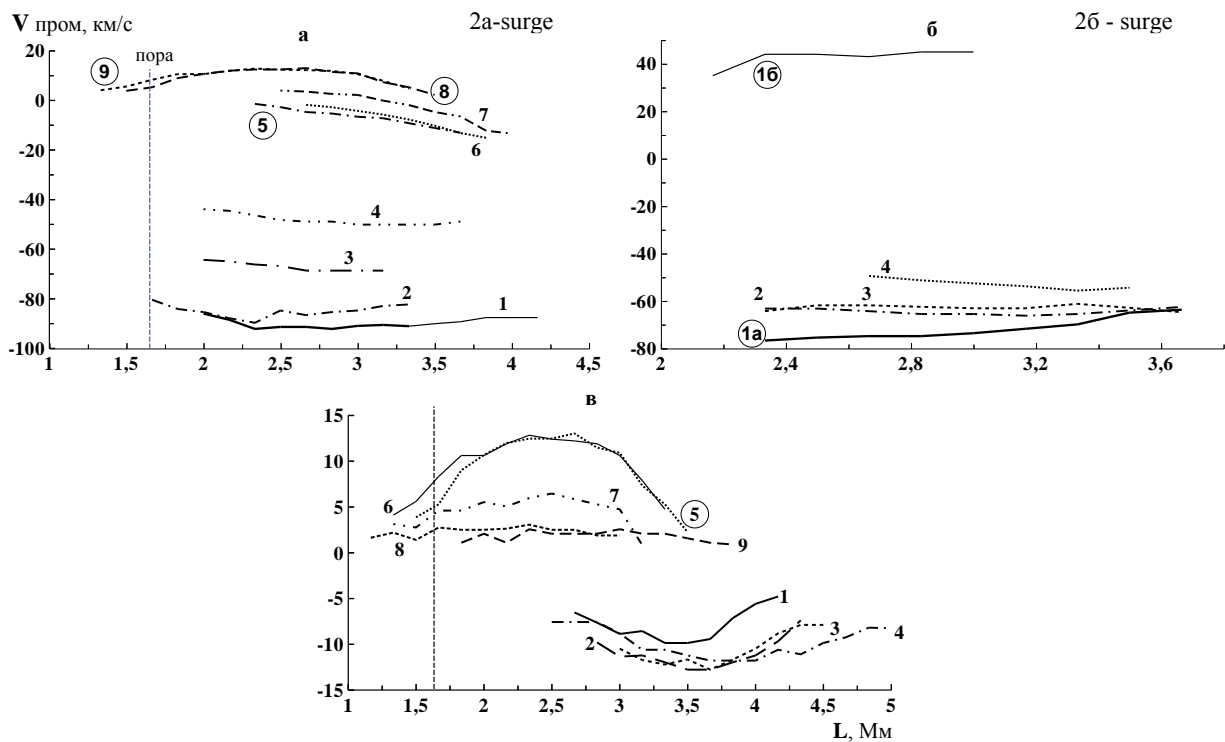
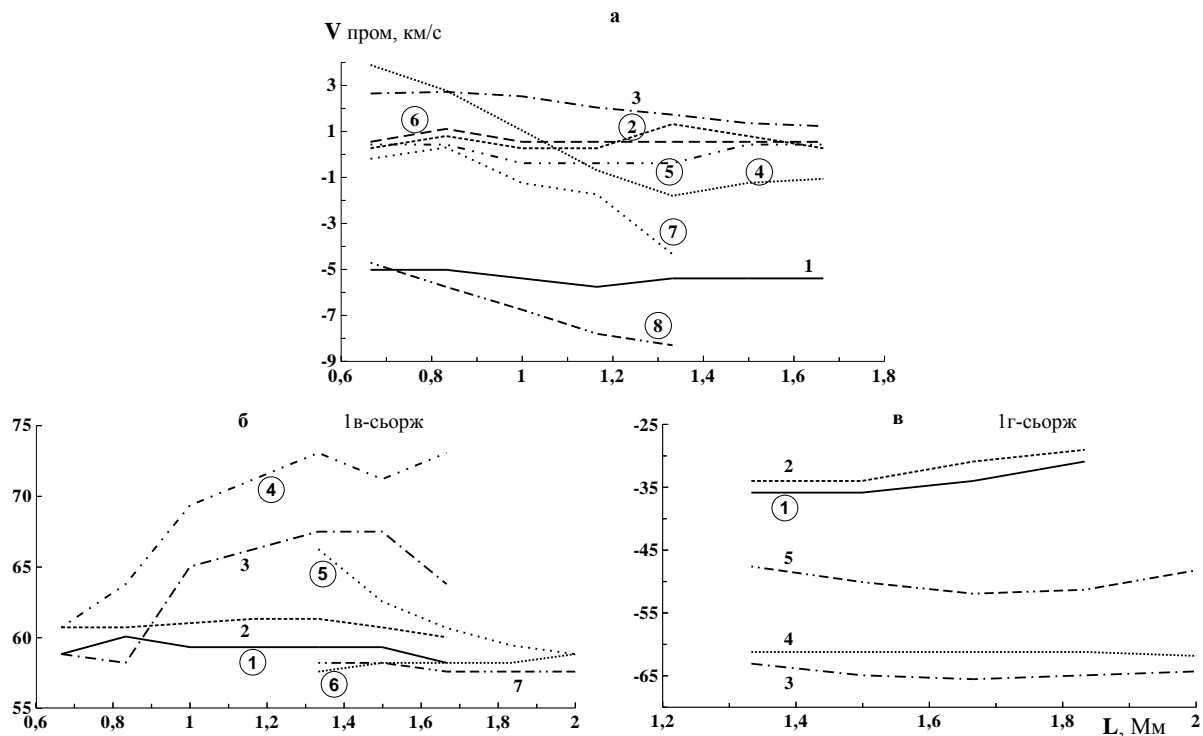


Рис. 6. а – те саме, що й на рис. 5, а, але для сьоржа 2а, моменти спостережень: 9:57:05 (95), 9:57:19 (100), 9:57:46 (110), 9:58:16 (120), 9:59:12 (140), 9:59:41 (150), 9:59:55 (155), 10:00:52 (175), 10:01:06 (180) UT – криві 1–9, відповідно; б – те саме, але для сьоржа 2б, моменти спостережень: 10:00:52 (175) UT – криві 1а і 1б та 10:01:06 (180), 10:01:20 (185), 10:01:48 (195) UT криві 2–4, відповідно; в – зміни хромосферної променевої швидкості у верхній частині магнітної петлі на рівні утворення ядра лінії  $H_{\alpha}$  в моменти спостережень: 9:57:05 (95), 9:57:19 (100), 9:57:46 (110), 9:58:16 (120), 10:00:52 (175), 10:01:06 (180), 10:01:20 (185), 10:01:48 (195), 10:02:31 UT – криві 1–9, відповідно. Від'ємні значення променевої швидкості відповідають руху у напрямку до спостерігача

У цей період часу у верхній частині магнітної петлі на рівні утворення ядра лінії  $\text{H}\alpha$  (рис. 6, в, криві 1–4 для спектрів 95–120) речовина рухалася вгору то сповільнюючись, то прискорюючись із невеликою швидкістю, яка змінювалася від  $-5$  до  $-13$  км/с. Видно, що всі криві на цьому графіку складаються з багатьох відрізків, це вказує на те, що потік речовини в цьому місці був сильно структурованим. Після моменту 10:00:52 UT (спектр 175) напрямок руху змінився на протилежний – речовина сьоржа досягла вершини магнітної петлі і під дією сили тяжіння почала опускатися по другій стороні петлі, це добре видно на кривих 5 і 6 на рис. 6, в. Із часом рух донизу сповільнювався і під час третього піку яскравості БЕ (через 105 с)  $V_{\text{пром}}$  хромосферної речовини змінювалася від однієї сторони сьоржа до іншої між 1 і 2,5 км/с (крива 9), не набагато перевищуючи значення  $V_{\text{пром}}$  на ділянці L2. У цей час у крилах лінії  $\text{H}\alpha$  сьоржі не спостерігалися, рух хромосферної речовини з невеликою швидкістю відбувався лише у верхній частині петлі.

Імпульсна фаза розвитку БЕ. З 10:05:21 UT (спектр 270) почала збільшуватись яскравість БЕ. Цей період складався з 5 піків з інтервалом близько 1 хв (див. рис. 4). Розглянемо особливості розвитку  $\text{H}\alpha$ -викидів під час спалахової або імпульсної фази розвитку БЕ.

Вигляд спектрів ділянки АО сильно змінився, це свідчить про те, що змінилась конфігурація магнітного поля. Якщо до цього часу викиди спостерігалися переважно в синьому крилі лінії  $\text{H}\alpha$  – речовина в них рухалася вгору, то на спектрах, отриманих під час імпульсної фази розвитку БЕ викиди видно також і у червоному крилі лінії (див. рис. 2, спектри 295 і 375). Це означає, що речовина викидів досягла певної висоти або вершин магнітних петель, по яких вона підіймалася, і почала рухатися вниз. З'явилися нові сьоржі – їх видно в червоному крилі спектрів. Почала формуватися нова пора на відстані 0,16 Мм від пори, що вже існувала.



**Рис. 7.** а – зміни хромосферної променевої швидкості у верхній частині магнітної петлі на рівні утворення ядра лінії  $\text{H}\alpha$  в різні моменти спостережень під час імпульсної фази БЕ: 10:05:21 (270), 10:06:32 (295), 10:07:14 (310), 10:07:43 (320), 10:08:39 (340), 10:09:22 (355), 10:10:18 (375), 10:11:15 (395) UT – криві 1–8, відповідно; б – те саме, що й на рис. 7, а, але для сьоржа 1в, моменти спостережень: 10:08:11 (330), 10:08:39 (340), 10:08:52 (345), 10:09:22 (355), 10:10:18 (375), 10:10:33 (380), 10:11:15 (395) UT – криві 1–7, відповідно; в – те саме, але для сьоржа 1г, моменти спостережень: 10:10:18 (375), 10:10:33 (380), 10:11:01 (390), 10:11:15 (395), 10:11:26 (399) UT – криві 1–5, відповідно

Розглянемо, які зміни відбувалися на ділянці АО біля пори під час імпульсної фази розвитку бомби Еллермана. Перші 3 хв, у місці, де під час першої фази еволюції БЕ розвивалися сьоржі 1а і 1б, рух хромосферної речовини відбувався лише у верхній частині петлі (рис. 7, а). Крива 1, отримана для моменту 10:05:21 UT (спектр 270) показує, що в цей час спостерігався висхідний рух із  $V_{\text{пром}}$ , яка не перевищувала  $-6$  км/с. Через 75 с (перший пік яскравості БЕ у спалаховій фазі її розвитку, спектр 295) напрямок руху змінився – речовина почала прискорюючися рухатися вниз зі швидкістю до 2,7 км/с (криві 2 і 3). Через наступні 75 с (другий пік на світловій кривій БЕ, спектр 320) у цьому місці існували два потоки плазми з протилежним напрямком руху (крива 4) з невеликими швидкостями – низхідний потік з  $V_{\text{пром}}$  до 4 км/с, а висхідний потік з  $V_{\text{пром}}$  до 2 км/с. За 1 хв, до третього піку яскравості БЕ, швидкість як угору, так і вниз зменшилася до  $\pm 0,5$  км/с (крива 5). Наступні 45 с, до 4-го піку яскравості БЕ, у цьому місці існував потік плазми з  $V_{\text{пром}}$ , яка не перевищувала 1 км/с (крива 6). Після 5-го піку яскравості БЕ (спектр 375) сформувався висхідний потік із поступово зростаючою швидкістю (криві 7 і 8), у кінці спостережень  $V_{\text{пром}}$  у ньому змінювалася між  $-4,7$  і  $-8,4$  км/с, бачимо, що швидкість біля пори була більшою.

На підставі рис. 7, а доходимо висновку, що зміни швидкості і напрямку руху плазми у верхній частині магнітної петлі збігаються за часом із підвищенням яскравості БЕ.

О 10:08:11 UT (спектр 330) у цьому місці почав розвиватися новий  $\text{H}\alpha$ -сьорж, в якому хромосферна речовина рухалася донизу з великою швидкістю, що досягала 60 км/с (крива 1, рис. 7, б). Водночас спостерігався третій максимум підвищення інтенсивності в червоному крилі лінії  $\text{H}\alpha$ . Наступні 75 с, до 4-го піку яскравості БЕ, швидкість поступово зростала (криві 2–4). У середній частині сьоржа і на краю біля пори  $V_{\text{пром}}$  збільшилася до 73 км/с. Криві 3 і 4, які показують розподіл  $V_{\text{пром}}$  по площі поперечного перерізу сьоржа, склалися з 5 відрізків. Це вказує на те, що в цей час у сьоржі існували 5 струменів плазми з різним розподілом швидкостей. Через 1 хв (5-й пік яскравості БЕ) у місці ближче до пори виникли одночасно висхідний і низхідний потоки, які було видно в синьому і червоному крилах лінії  $\text{H}\alpha$  (крива 5 на рис. 7, б і крива 1 на рис. 7, в). Імовірно, вони були результатом магнітного перез'єднання, яке відбулося між петлями магнітного потоку, що виходив. Швидкість як у низхідному, так і у висхідному потоці зменшувалася вздовж поперечного перерізу в бік пори від 66 до 59 км/с і від – 36 до – 31 км/с, відповідно. Надалі до кінця спостережень потік плазми донизу сповільнився до 58 км/с (крива 7, рис.7, б), а  $V_{\text{пром}}$  у висхідному потоці (рис. 7, в) за 15 с знизилася в середньому до – 31 км/с (крива 2). Потім через 30 с з'явився новий викид хромосферної речовини зі швидкістю до – 65 км/с (крива 3), із часом  $V_{\text{пром}}$  у ньому зменшилася до – 50 км/с (криві 4, 5). Тобто в кінці спостережень у цьому місці існували два потоки з протилежним напрямком руху речовини (рис. 7, б і в).

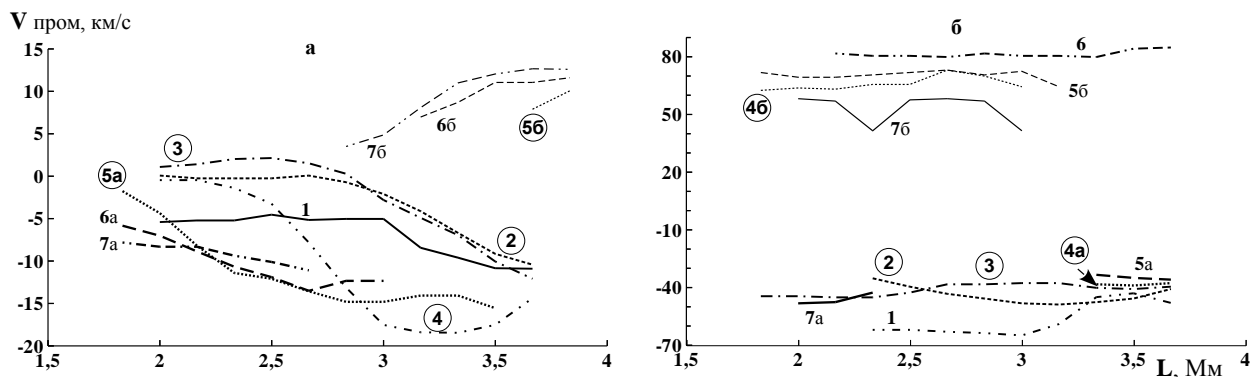


Рис. 8. а – те саме, що й на рис. 7, а, але для моментів: 10:05:21 (270), 10:06:32 (295), 10:07:42 (320), 10:08:39 (340) UT – криві 1–4, відповідно, та 10:10:18 (375), 10:10:47 (385), 10:11:15 (395) UT – криві 5a і 5b, 6a і 6b, 7a і 7b, відповідно; б – те саме, що й на рис. 8, а, але для сьоржа, моменти спостережень: 10:07:14 (310), 10:07:43 (320), 10:08:39 (340) UT – криві 1–3, відповідно, та 10:08:52 (345), 10:09:08 (350), 10:10:33 (380), 10:11:26 (399) UT – криві 4a і 4b, 5a і 5b, 6, 7a і 7b, відповідно

На спектрі, отриманому в момент 10:05:21 UT (спектр 270), коли почала збільшуватись яскравість БЕ, у місці, де під час фази попереднього нагрівання БЕ розвивалися сьоржі 2, у короткохвильовому крилі  $\text{H}\alpha$  видно викид із висхідним рухом хромосферної речовини. Профілі сьоржа проєктувалися на синє крило і ядро лінії, яке було зміщене у синій бік спектра. На рис. 8, а подано зміни променевої швидкості речовини по площі поперечного перерізу сьоржа. Крива 1 показує, що сьорж складався з декількох струменів і речовина на боці біля пори рухалася з меншою швидкістю, ніж на протилежній стороні –  $V_{\text{пром}}$  збільшувалася від – 5 до – 11 км/с. Імовірно, це пов'язано зі структурою магнітного поля у викиді і навколишній хромосфері. До першого піку яскравості БЕ (спектр 295) швидкість руху плазми на боці біля пори зменшилась і становила близько 0 км/с,  $V_{\text{пром}}$  на іншому боці не змінилася (крива 2). За наступні 75 с (спектр 320) у верхній частині петлі з'явився потік речовини донизу з невеликою швидкістю до 2,2 км/с (крива 3). Упродовж однієї хвилини, до наступного піку яскравості БЕ (спектр 340),  $V_{\text{пром}}$  на боці, протилежному від пори, зросла до – 8,5 км/с (крива 4). Треба звернути увагу на те, що всі криві зміни швидкості склалися з декількох відрізків, що вказує на багатопотокову структуру  $\text{H}\alpha$ -викиду. Після п'ятого і найвищого піку яскравості БЕ (спектр 375) поряд із висхідним потоком, який існував біля пори (крива 5a), почав формуватися низхідний потік (крива 5b). До кінця спостережень швидкість потоку вгору зазнавала коливання (криві 6a і 7a) між –2 і –15 км/с, а швидкість потоку вниз зростала (криві 6b і 7b) від 8 до 13 км/с. На рис. 8, а добре видно, що поступово межа між висхідним і низхідним потоками зсувалася в бік пори – простір, який займав низхідний потік збільшувався (криві 5b–7b). Це вказує на те, що все більша частина речовини сьоржа поступово досягла певної висоти і під дією сили тяжіння почала опускатися по траєкторії, близькій до тієї, якою вона підіймалася. Профілі лінії  $\text{H}\alpha$  у спектрах, отриманих у цей час, стали дуже широкими, їхня півширина була в 2,3 рази більшою порівняно з профілем для незбуреної хромосфери – 0,2 і 0,086 нм, відповідно. Центральна частина деяких профілів складалася з двох компонент, ядра яких були зміщені у протилежні сторони (див., наприклад, профіль 4 на рис. 3). Такого виду профілі виявлено в роботі [16], автори назвали їх двопелюстковими і пояснили існуванням поряд потоків із протилежним напрямком руху холодної плазми уздовж багатопотокової структури сьоржа. Причому профіль для висхідного потоку зміщувався в синій бік спектра, а низхідного – у червоний бік відносно профілю для незбуреної хромосфери.

Сьорж із великою швидкістю, що становила близько – 65 км/с вгору, утворився в цьому місці близько 10:07:14 UT (спектр 310). Крива 1 рис. 8, б показує, що він складався з декількох струменів, які рухалися з різними  $V_{\text{пром}}$  від – 43 до – 65 км/с. Швидкість плазми в сьоржі поступово зменшувалася – у момент другого піку яскравості БЕ (спектр 320) на краях поперечного перерізу  $V_{\text{пром}}$  становила – 35 км/с, а в центральній частині – 49 км/с (крива 2). У момент спостережень 10:07:57 UT (спектр 325) на спектрі з'явилася нова темна деталь біля пори – поряд із сьоржем виник новий струмінь плазми зі швидкістю близько (–37)–(–39) км/с. Під час 3-го піку яскравості БЕ розподіл швидкості у викиді показує, що він складався з 3-х струменів (крива 3),  $V_{\text{пром}}$  у них змінювалася від – 38 до – 45 км/с. Починаючи зі спектра 345 (10:08:52 UT – біля 4-го піку інтенсивності в червоному крилі, див. рис. 4) з'явився викид і в довгохвильовому крилі з рухом плазми вниз зі швидкістю до 63–73 км/с, тобто в цей час існували два потоки, які рухалися у протилежні сторони (криві 4a і 4b). Із часом рух вгору сповільнювався (криві 2, 3, 4a, 5a) і через 2 хв після

виникнення сьоржа, о 10:09:08 UT (спектр 350) Впром у ньому знизилася майже вдвічі, до приблизно – 33 км/с (крива 5а). Швидкість руху в низхідному потоку зростала і о 10:10:33 UT (спектр 380) вона становила в середньому 82 км/с (крива 6). В останній момент спостереження о 10:11:26 UT (спектр 399), імовірно, відбулося ще одне магнітне Perez'єднання. На це вказує те, що з'явилися два нові дуже структуровані потоки з рухом у протилежні сторони зі швидкостями вгору до – 48 км/с (крива 7а) і донизу в середньому до 55 км/с (крива 7б).

**Обговорення результатів і висновки.** У цій роботі ми продовжуємо вивчати динаміку атмосфери активної області NOAA 11024 на основі спектрополяриметричного матеріалу, отриманого О. В. Хоменко 4 липня 2009 р. на франко-італійському телескопі THEMIS із високими просторовою (~ 1") і часовою (близько 3 с) роздільними здатностями. Для дослідження зв'язку між такими маломасштабними елементами сонячної активності, як бомби Еллермана і  $H\alpha$ -викиди, обрано ділянку з високою активністю. Вона містилась в області нового магнітного потоку, що в цей час виходив, на ній існувала пара, розвивалася бомба Еллермана і під час спостережень виникло багато хромосферних викидів (сьоржів).

Досліджено особливості утворення і розвитку  $H\alpha$ -сьоржів, що з'явилися поряд із порою, яка знаходилася на відстані 7,2 Мм від бомби Еллермана. За спектрами дуже добре можна простежити еволюцію сьоржів від їхньої появи до зникнення, якщо це дозволяв обмежений час спостережень. У більшості випадків у короткохвильовому крилі лінії  $H\alpha$  з'являлася темна деталь, яка із часом (для сьоржа 2а протягом 2,5 хв) поступово зміщувалася до ядра лінії, накладалася на нього і починала зміщуватися на довгохвильове крило. Вказуючи на те, що сьорж, рухаючися вгору по магнітній петлі, досяг певної висоти, або верхньої частини петлі і під дією сили тяжіння почав спускатися вниз по траєкторії близькій до тієї, якою підіймався, або по другій стороні петлі.

За доплерівськими зсувами компоненти профілю, що відповідала сьоржу, щодо положення ядра лінії  $H\alpha$  в лабораторному спектрі, були розраховані променеві швидкості руху хромосферної речовини у  $H\alpha$ -викадах. У роботі проаналізовано зміни променевої швидкості і напрямку руху хромосферної речовини в сьоржах. Виявлено, що у більшості випадків сьоржі виникали з великою швидкістю – Впром руху плазми вгору досягала – 95 км/с, а вниз становила 80 км/с. Із часом швидкість зменшувалася, але речовина рухалася по магнітній петлі нерівномірно – то сповільнюючись, то прискорюючись. Криві розподілу швидкості по поперечному перерізу сьоржів показали, що вони мають багатопотокову структуру. Швидкість струменів, з яких склалися  $H\alpha$ -викиди, була різною і, напевно, залежала від структури магнітного поля у сьоржі і навколишньому середовищі. У багатьох випадках під час магнітних Perez'єднань утворювалися два струмені, які рухалися у протилежні боки з великими швидкостями. Причому на спектрі одночасно з'являлися темні деталі як у синьому, так і в червоному крилі лінії  $H\alpha$ . Із часом їхня швидкість сповільнювалася до того, що відповідні їм компоненти профілю накладалися на центральну частину профілю лінії  $H\alpha$  і були зміщені у протилежні сторони від ядра профілю лінії для незбуреної хромосфери. Це вказувало на існування поряд протилежно спрямованих потоків (див. рис. 3, профіль 4).

У верхній частині магнітних петель Впром плазми змінювалася між – 20 км/с і 15 км/с. Значення швидкості на ділянці без активних утворень не перевищували  $\pm 2$  км/с. Час існування сьоржів був різним – він змінювався від 30 с до майже 5 хв. У більшості випадків висхідні й низхідні потоки плазми з'являлися одночасно зі збільшенням яскравості БЕ. Це вказує на те, що в цей час відбувалися магнітні Perez'єднання, які відповідали за обидва процеси. Тобто частина магнітної енергії в результаті Perez'єднань перетворювалася на тепло, а частина – на кінетичну енергію руху сьоржей.

Наше дослідження показує, що бомба Еллермана і хромосферні викиди, які розвивалися біля пори на ділянці активної області, були результатом магнітних Perez'єднань, викликаних виходом нового змієподібного магнітного потоку. Те, що підвищення швидкості руху хромосферної речовини у сьоржах, зміни напрямку її руху, утворення нових сьоржів збігалися за часом із підвищенням яскравості БЕ, вказує на зв'язок між бомбою Еллермана і  $H\alpha$ -сьоржами.

У нашій роботі проведено детальне дослідження утворення і розвитку  $H\alpha$ -сьоржів. Отримані результати можуть знайти застосування у перевірці існуючих і створенні нових теоретичних моделей  $H\alpha$ -сьоржів.

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

#### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- Bong Su. -Ch., Cho K. -S., Yurchyshyn V. Kinematics of Solar Chromospheric Surges of AR 10930 // Journal of the Korean Astronomical Society. – 2014 – vol. 47, no. 6. – P. 311–317.
- Dominguez S. V., L. van Driel-Gesztelyi, Bellot Rubio L. R. Granular-Scale Elementary Flux Emergence Episodes in a Solar Active Region // Solar Phys. – 2012. – Vol. 278, Iss 1. – P. 99–120.
- Borovik A.V., Myachin. D.Yu. The spotless flare of March 16, 1981. I. Preflare activations of the chromospheric fine structure // Solar Phys. – 2002. – Vol. 205, Iss. 1. – P. 105–116.
- Guglielmino S. L., Bellot Rubio L. R., Zuccarello F., et al. Multiwavelength observations of small-scale reconnection events triggered by magnetic flux emergence in the solar atmosphere // Astrophys. J. – 2010. – Vol. 724. – P. 1083–1098.
- Kondrashova N. N., Pasechnik M.N., Chornogor S.N., et al. Atmosphere dynamics of the active region NOAA 11024 // Solar Phys. – 2013. – Vol. 284, Iss. 2. – P. 499–513.
- Kurokawa H., Kawai G. 1993,  $H\alpha$  surge activity at the first stage of magnetic flux emergence // The Magnetic and Velocity Fields of Solar Active Regions, ASP Conf. Ser. – 1993. – Vol. – 46. – P 507–510.
- Madjarska M. S., Doyle J. G., de Pontieu B. Explosive events associated with a surge // Astrophys. J. – 2009. – Vol. 701. – P. 253–259.
- Matsumoto T., Kitai R., Shibata K., et al. Cooperative observation of Ellerman bombs between the Solar Optical Telescope aboard Hinode and Hida/Domeless Solar Telescope // Publ. Astron. Soc. Japan. – 2008. – Vol. 60. – P. 577–585.
- Nelson C. J., Doyle J. G., Erdelyi R., et al. Statistical Analysis of Small Ellerman Bomb Events // Solar Phys. – 2013. – Vol. 283, Iss. 2. – P. 307–323.
- Pariat E., Schmieder B., Berlicki A., et al. Spectrophotometric analysis of Ellerman bombs in the Ca II,  $H\alpha$ , and UV range // Astron. and Astrophys. – 2007. – Vol. 473. – P. 279–289.
- Pasechnik M. N. Spectral Study of the Active Region with the Ellerman Bomb and  $H\alpha$ -Surges. Chromosphere. Ellerman Bomb // Kinematics and Physics of Celestial Bodies. – 2021. – vol. 37, Iss. 1. – P. 1–15.
- Reid A., Mathioudakis M., Scullion E., et al. Ellerman bombs with jets: cause and effect // Astrophys. J. – 2015. – Vol. 805, Iss. 1, article id. 64 – 9p.
- Roy J. -R. The Dynamics of Solar Surges // Solar Phys. – 1973 – Vol. 32, Iss. 1. – P. 139–151.
- Rust D. M. Chromospheric Explosions and Satellite Sunspots // Journal: Structure and Development of Solar Active Regions. Symposium no. 35 held in Budapest, Hungary, 4–8 September 1967. International Astronomical Union. Symposium no. 35, Dordrecht, D. Reidel. – 1968. – P. 76–83.
- Valori G., Green L. M., Demouli P., et al. Nonlinear force-free extrapolation of emerging flux with a global twist and serpentine fine structures // Solar Phys. – 2012. – Vol. 278, Iss. 1. – P. 73–97.

16. Verma M., Denker C., Diercke A., et al. High-resolution spectroscopy of a surge in an emerging flux region // *Astron. & Astrophys.* – 2020. – Vol. 639, id.A19. – P. 1–12.
17. Wang J., Zhou T., Ji H.  $H_{\alpha}$  Surges Initiated by Newly-emerging Satellite Magnetic Fields // *Chinese Astron. and Astrophys.* – 2014. – Vol. 38, Iss. 1. – P. 65–74.
18. Watanabe H., Vissers G., Kitai R., et al. Ellerman bombs at high resolution: 1. Morphological evidence for photospheric reconnection // *Astrophys. J.* – 2011. – Vol. 736, Iss. 1. – P. 71–83.
19. Zirin, H.: 1966, *The Solar Atmosphere*, Blaisdell Publ. Co., Massachusetts, U.S.A.

Надійшла до редколегії 14.07.2021

M. Pasechnik, PhD

Main astronomical observatory of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

### STUDY OF THE CONNECTION BETWEEN ELLERMAN BOMB AND $H_{\alpha}$ -SURGES

*Based on the analysis of spectral observations in the  $H_{\alpha}$  line of a site of the active region NOAA 11024, where the Ellerman bomb appeared and developed and during our observations various types of chromospheric matter ejections were formed, a study of the connection between these small-scale elements of solar activity has been carried out. Spectral data with high spatial and temporal resolution were obtained with the French-Italian 90-cm vacuum telescope THEMIS (Tenerife, Spain) on July 4, 2009. The observation time was 20 minutes.*

*The AR site under investigation was in the region of a new magnetic flux emerging at this time. A site with high activity was selected – it was a pore on it, the Ellerman bomb (EB) was developing and many chromospheric ejections (surges) arose. The features of the formation and development of surges that appeared near the pore, which was at a distance of 7.2 Mm from the Ellerman bomb, were studied. Changes in the line-of-sight velocity (Vlos) and the direction of chromospheric matter motion in  $H_{\alpha}$ -surges are analyzed. During our observations, the maximum plasma velocity upward reached – 95 km/s, and downward – 80 km/s. In the upper part of the magnetic loops, the Vlos of the plasma varied between – 20 km/s and 15 km/s. The velocity values in the area without active formations did not exceed  $\pm 2$  km/s. The distribution of velocities within  $H_{\alpha}$ -surges showed that they mainly had a fine structure – they consisted of several jets. In most cases, upward and downward plasma flows occurred simultaneously with an increase in the EB brightness.*

*Our study showed that during a sharp increase in the brightness of the EB, the chromospheric matter velocities in the surges increased, the direction of its movement changed, new surges appeared, which indicates a connection of the  $H_{\alpha}$ -surges that developed near the pore with the Ellerman bomb, as well indicates that all these processes were the result of magnetic reconnections caused by the emergence of a new serpentine magnetic flux and its interaction with the pre-existing magnetic field.*

*Key words: active region, magnetic flux, magnetic reconnection, Ellerman bomb,  $H_{\alpha}$ -surge.*