

УДК 523.985.3

**М. Н. Пасечник**Главная астрономическая обсерватория НАН Украины, Киев  
ул. Академика Заболотного 27, Киев, 03680  
rita@mao.kiev.ua**Спектральное исследование пары бомб Эллермана**

Представлены результаты анализа спектральных наблюдений в линии  $H$  двух бомб Эллермана (БЭ-1 и БЭ-2), которые возникли и развивались в активной области NOAA 11024 на участке выходящего магнитного потока. Спектральные данные с высоким пространственным и временным разрешением были получены на франко-итальянском солнечном телескопе THEMIS (о. Тенерифе, Испания) 4 июля 2009 г. Профили линии  $H$ , полученные для разных периодов развития бомб Эллермана, были асимметричными с избытком эмиссии в длинноволновом крыле. Изменения интенсивности в крыльях линии указывают на то, что во время бомб Эллермана происходило как постепенное, так и импульсное выделение энергии. Временные вариации лучевых скоростей ( $V_{\text{луч}}$ ) хромосферного вещества на уровне образования ядра линии  $H$  имели два периода увеличения скорости, которые состояли из нескольких индивидуальных пиков. Максимальная лучевая скорость вещества составляла  $-9$  и  $8$  км/с к наблюдателю и от наблюдателя соответственно. В некоторые моменты наблюдались быстрые потоки плазмы вверх ( $V_{\text{луч}}$  до  $-80$  км/с) и вниз ( $V_{\text{луч}}$  до  $50$  км/с). Бомбы Эллермана сопровождалась небольшими выбросами хромосферного вещества (сержами) продолжительностью около  $0.5$ – $1.5$  мин. Обнаружена тонкая структура БЭ на спектрах линии  $H$ , полученных в течение  $4$  мин во время резкого увеличения интенсивности в крыльях линии. Особенности изменения интенсивности в крыльях линии  $H$  и лучевой скорости хромосферного вещества указывают на то, что исследованные в работе две бомбы Эллермана возникли и развивались как физически связанная пара. Наши результаты поддерживают модель, в которой механизмом образования бомб Эллермана считается магнитное пересоединение в нижних слоях атмосферы.

*СПЕКТРАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРИ БОМБ ЕЛЛЕРМАНА, Пасечник М. М. — Представлено результати аналізу спектральних спостережень у лінії H $\alpha$  двох бомб Еллермана (БЕ-1 та БЕ-2), які виникли і розвивалися в активній області NOAA 11024 на ділянці магнітного потоку, що виходив. Спектральні дані з високою просторовою та часовою роздільною здатністю було отримано на франко-італійському сонячному телескопі THEMIS (о. Тенерифе, Іспанія) 4 липня 2009 р. Профілі лінії H $\alpha$ , отримані для різних періодів розвитку бомб Еллермана, були асиметричні з надлишком емісії в довгохвильовому крилі. Зміни інтенсивності у крилах лінії вказують на те, що під час бомб Еллермана відбувалося як поступове, так і імпульсне виділення енергії. Часові варіації променевої швидкості ( $V_{np}$ ) хромосферної речовини на рівні утворення ядра лінії H $\alpha$  мали два періоди збільшення швидкості, які склалися з декількох індивідуальних піків. Максимальна променева швидкість становила  $-9$  км/с при русі до спостерігача і  $8$  км/с при русі від спостерігача. В деякі моменти спостерігались швидкі потоки плазми вгору ( $V_{np}$  до  $-80$  км/с) і вниз ( $V_{np}$  до  $50$  км/с). Бомби Еллермана супроводжувалися невеликими викидами хромосферної речовини, тривалістю близько  $0.5$ — $1.5$  хв. Виявлено тонку структуру БЕ на спектрах лінії H $\alpha$ , отриманих протягом  $4$  хв під час різкого збільшення інтенсивності у крилах лінії. Особливості змін інтенсивності у крилах лінії H $\alpha$  і променевої швидкості хромосферної речовини вказують на те, що досліджені в роботі дві бомби Еллермана виникли і розвивалися як фізично пов'язана пара. Наші результати підтримують модель, у якій механізмом утворення бомб Еллермана вважається магнітне пересполучення у нижніх шарах атмосфери.*

*SPECTRAL STUDY OF PAIR ELLERMAN BOMBS, by Pasechnik M. N. — The results of the spectral observation analysis in the H $\alpha$  line of two Ellerman bombs (EB-1 and EB-2), which were formed and have developed in the active region NOAA 11024 in the emerging magnetic flux area, are presented. The spectral data, with high temporal and spatial resolution, were obtained with the French-Italian solar telescope THEMIS (the island of Tenerife, Spain) on July 4, 2009. The H $\alpha$  line profiles, obtained during different periods of the EBs evolution, were asymmetrical with excess emission in the long-wavelength wing. The intensity changes of the line wings indicate that the EBs occurred as a gradual and pulsed release of energy. The temporal variations of the chromospheric line-of-sight velocities ( $V_{LOS}$ ) at the heights of the H $\alpha$  core formation meant that there were two periods of increasing the  $V_{LOS}$  consisting of several individual peaks. The maximum  $V_{LOS}$  toward and from the observer was  $-9$  km/s and  $8$  km/s, respectively. During observation there were some moments of upward plasma flows with  $V_{LOS}$  up to  $-80$  km/s and downward flows with  $V_{LOS}$  up to  $50$  km/s. Ellerman bombs were accompanied by small chromospheric ejections (surges), lasting about  $0.5$  —  $1.5$  minutes. The fine*

*structure of EB found on the H line spectra, was obtained during the sharp increase of intensity in the line wings lasting about 4 minutes. Features of intensity change in the H line wings and variations of the line-of-sight velocity of chromospheric matter indicate that the two investigated EBs occurred and developed as a physically connected pair. Our results support a model in which the triggering mechanism of formation EBs is a magnetic reconnection in the lower atmosphere.*

## ВВЕДЕНИЕ

Как известно, бомбы Эллермана (БЭ) — это короткоживущие мелкомасштабные яркие структуры в атмосфере Солнца, связанные с быстрым локальным выделением энергии, с магнитными полями и специфическими движениями плазмы. Наблюдаются БЭ в крыльях сильных хромосферных линий, а также в УФ-континууме. Наблюдения показывают, что бомбы Эллермана возникают преимущественно в молодых развивающихся активных областях (АО) со сложной магнитной структурой, в областях выходящих магнитных потоков и в окрестностях солнечных пятен. Так же, как и солнечные вспышки, БЭ локализованы вблизи нулевых линий продольного магнитного поля и в местах вкрапления полей противоположной магнитной полярности. Несмотря на то что изучению этого интересного явления посвящено много исследований [1—14, 16—27, 29—39, 41—44], его природа до конца не понята, и физическая интерпретация все еще остается неопределенной.

Впервые Эллерман обратил внимание на это явление во время визуальных и фотографических наблюдений Солнца на обсерватории Маунт Вилсон и назвал его солнечными водородными «бомбами» [17]. Во время его наблюдений 21 сентября 1915 г. в крыльях водородной линии H неожиданно появилась очень яркая и узкая эмиссионная полоса, которая распространялась на 0.4—0.5 нм по обе стороны от линии, но не пересекала ее, через несколько минут она исчезла. Это было настолько невероятным, что показалось едва ли реальным. Однако после второго наблюдения стало ясно, что такое явление действительно происходит как часть солнечной активности. Более того, оказалось, что оно уже было описано ранее Вальтером Митчеллом в 1909 г. в отчете о наблюдениях Солнца на телескопе Хаверфордского колледжа. Наблюдения показали, что более слабые эмиссионные полосы появляются и в крыльях линий H и H .

Новый этап в изучении бомб Эллермана начался почти через 40 лет на Крымской астрофизической обсерватории [1, 3, 6—8, 29, 38]. С 1954 г. А. Б. Северным с сотрудниками было получено большое количество спектрограмм БЭ. За внешний вид в спектрах линии H это явление получило еще одно название — «усы». Было установлено, что большинство БЭ располагаются под системами арочных волокон, поглощающими излучение, в результате чего и образуется глубокое аб-

сорбционное ядро линии H $\beta$ . Оказалось, что БЭ — это кратковременные образования, появляющиеся в активных областях в виде маленьких ярких точек. При этом в линии H $\beta$  чаще всего хорошо выражено только синее крыло усов, а красное находится на пределе обнаружения. Было высказано предположение, что большая протяженность эмиссионных крыльев (0.7—1.0 нм) вызвана эффектом Доплера и соответствует скоростям в несколько сотен км/с, и что это явление можно представить как выброс частиц в результате симметричного взрыва в атмосфере Солнца. Малый размер очагов эмиссии указывал на большую плотность энергии в них. Для объяснения широких эмиссионных крыльев хромосферных линий А. Б. Северный предложил модель, согласно которой БЭ представляют собой компактную область со сходящимися или расходящимися струями плазмы [7, 8, 38].

Основные свойства БЭ описывались неоднократно [19, 26, 27, 30, 33, 35, 42, 44]. Было установлено, что типичный размер и среднее время жизни БЭ равны 1 и 15 мин соответственно. Однако наблюдаются БЭ размером около 0.3 и менее одной минуты жизни [33], а также БЭ продолжительностью больше часа, световые кривые которых состоят из нескольких импульсов. Часто БЭ сопровождаются небольшими хромосферными выбросами — сержами [18, 31, 32, 44]. Как считается, это свидетельствует о магнитном пересоединении в нижней хромосфере. Профили хромосферных линий в спектрах БЭ [18, 19, 22, 26, 36, 44] характеризуются глубоким поглощением в центре линии и повышенным излучением в крыльях (в линии H $\beta$  с максимумом около  $\pm 0.1$  нм от ее центра, и в линии Ca II H с максимумом около  $\pm 0.035$  нм), исчезающим после  $\pm 0.5$  нм. Некоторые исследователи интерпретируют это как доказательство образования БЭ в нижних слоях атмосферы, ниже области, где формируется ядро линии H $\beta$  в спокойном Солнце, и вероятно, близко к области температурного минимума [11, 12]. В основном БЭ наблюдаются в линии H $\beta$ , но также видны как яркие точки в линии Ca II H ( $\lambda = 854.2$  нм) и в УФ-континууме вблизи  $\lambda = 160$  нм [3, 12, 20, 23, 25, 32, 36]. Исследования показали, что хромосферная линия Ca II H является хорошим индикатором бомб Эллермана и может дать новую информацию об этом явлении. Была открыта тонкая структура бомб Эллермана [20, 32]. Оказалось, что они состоят из двух частей: центральной, расположенной вдоль нейтральной линии магнитного поля, и диффузного гало. Считается, что БЭ имеют воронкообразную структуру, т. е. их пространственный масштаб больше в хромосфере, чем в фотосфере [27]. В работах [18, 19] сделан вывод, что БЭ можно назвать субмикровспышками, так как их энергия составляет  $10^{19}$  —  $5 \cdot 10^{20}$  Дж. Кроме того, оказалось, что БЭ могут генерировать периодические колебания скорости вдоль петли и вызывать события большего масштаба пересоединения [25].

Есть ряд моделей, объясняющих основные наблюдательные свойства бомб Эллермана. В настоящее время наиболее разрабатываемой является модель, в которой БЭ образуются в результате магнитного

пересоединения в нижнем слое хромосферы или верхнем слое фотосферы при большой плотности вещества и напряженности магнитного поля [12, 16, 18, 19, 21, 24, 26, 36, 37, 39, 42]. Рассматриваются как тепловой, так и нетепловой механизмы (пучки энергичных частиц) возбуждения бомб Эллера. При этом энергия магнитного поля расходуется в основном на ускорение потоков плазмы. Предполагают, что во время развития БЭ образуются двунаправленные струи, идущие от места пересоединения. В работе [31] на основе спектральных наблюдений потоков газа в бомбах Эллера было показано, что двунаправленные потоки начинаются между нижней фотосферой и нижней хромосферой, и высказано предположение, что именно в этом слое атмосферы происходят магнитные пересоединения, в результате которых образуются бомбы Эллера.

Во многих исследованиях изучались скорость и направление движения вещества в областях развития бомб Эллера. Согласно разным оценкам на уровне хромосферы вещество движется вверх со скоростью 15—18 км/с [3], 1—3 км/с [31] либо 6—8 км/с по данным [26, 30]. В работе [39] при теоретических расчетах был получен сильный нисходящий поток с  $V_{\text{луч}} \sim 10$  км/с между верхней фотосферой и нижней хромосферой. С другой стороны, в фотосфере были найдены нисходящие потоки со скоростями от 0.1 до 0.5 км/с.

Наблюдения показали [44], что 50 % бомб Эллера появляются и исчезают попарно со средним расстоянием между компонентами около 2200 км. Как правило, БЭ в такой паре развиваются синхронно, причем ось каждой пары составляет небольшой угол с линиями магнитного поля. Полагают, что это связано со всплывающими биполярными трубками магнитного поля.

Цель нашей работы — получить новые наблюдательные данные для бомб Эллера. Мы представляем результаты анализа спектральных наблюдений двух бомб Эллера, которые возникли и развивались в активной области NOAA 11024. Изучены особенности изменения интенсивности линии H в спектрах, полученных на разных стадиях развития БЭ, а также исследованы изменения лучевых скоростей хромосферного вещества в области бомб Эллера и в их окрестностях.

## НАБЛЮДАТЕЛЬНЫЙ МАТЕРИАЛ

Активная область NOAA 11024 в день наших наблюдений 4 июля 2009 г. находилась на начальной стадии своего развития (она появилась в виде факельной площадки 29 июня), активность ее быстро росла [4, 28]. Участок АО, на котором развились исследованные в данной работе бомбы Эллера, находился в области одного из трех выходящих в это время магнитных потоков [40]. Группа пятен была биполярной с вкраплениями большого количества элементов противоположных полярностей, расположенных вдоль оси, соединяющей

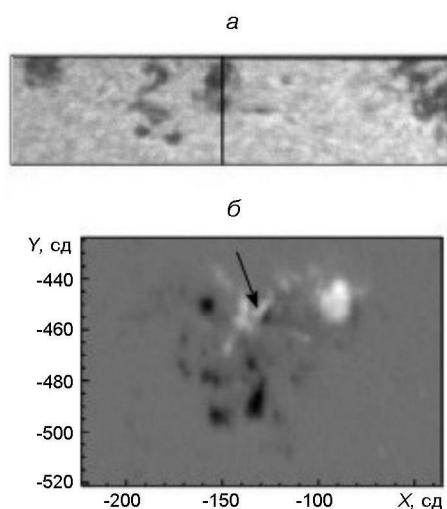


Рис. 1: *a* — участок исследуемой активной области NOAA 11024 4 июля 2009 г., вертикальная линия — положение щели спектрографа; *б* — магнитограмма АО, полученная SOHO/MDI в день наблюдений в  $9^{\text{h}}36^{\text{m}}$  UT, положительная и отрицательная полярности обозначены соответственно белым и черным цветом, стрелкой указан исследуемый участок

основные полярности. Координаты области в день наблюдений — S25E02 ( $-29$ ,  $-449$ ), т. е. она находилась на солнечном диске возле центрального меридиана, поэтому все определяемые параметры были без существенных искажений.

В этой работе мы использовали спектральные данные, которые были получены Е. В. Хоменко на франко-итальянском 90-см вакуумном телескопе THEMIS (Испания, о. Тенерифе) с высоким пространственным и временным разрешениями. В течение 20 мин ( $9^{\text{h}}30^{\text{m}}$  —  $9^{\text{h}}50^{\text{m}}$  UT) было получено 400 спектров с временным интервалом около 3 с. Мы использовали из них 47 наиболее качественных.

На рис. 1 показаны участок исследуемой АО с указанием положения щели спектрографа, а также магнитограмма АО, полученная SOHO/MDI 4 июля 2009 г. в  $9^{\text{h}}36^{\text{m}}$  UT. Рассматриваемый участок АО включал две поры противоположной полярности. Напомним, что бомбы Эллермана развиваются, как и вспышки, в местах вкрапления полей противоположной магнитной полярности.

На рис. 2 представлены H-спектры, полученные в разные моменты наблюдений. В нижней части одного из первых спектров ( $9^{\text{h}}30^{\text{m}}56^{\text{s}}$  UT) видна полоса с повышенной яркостью. На этом же спектре стрелкой указан исследуемый участок АО. На спектре, полученном в  $9^{\text{h}}42^{\text{m}}28^{\text{s}}$  UT, видны две протяженные яркие узкие эмиссионные полосы в крыльях линии H, тогда как центральная часть линии занята поглощением — это развившиеся за это время две бомбы Эллермана (БЭ-1 и БЭ-2). Ширина участка спектра, включающего линию H, составляла около 0.6 нм. Видно, что эмиссия в крыльях линии выходит за пределы этого участка, поэтому оказалось невозможным определить, насколько увеличилась ширина крыльев линии за время развития БЭ. Следует отметить, что спектры бомб Эллермана по своему виду противоположны спектрам вспышек, на которых, наоборот, наблюдается сильная эмиссия в ядре линии H и не очень протяженные довольно слабые крылья. На спектре, полученном в  $9^{\text{h}}44^{\text{m}}42^{\text{s}}$  UT, на

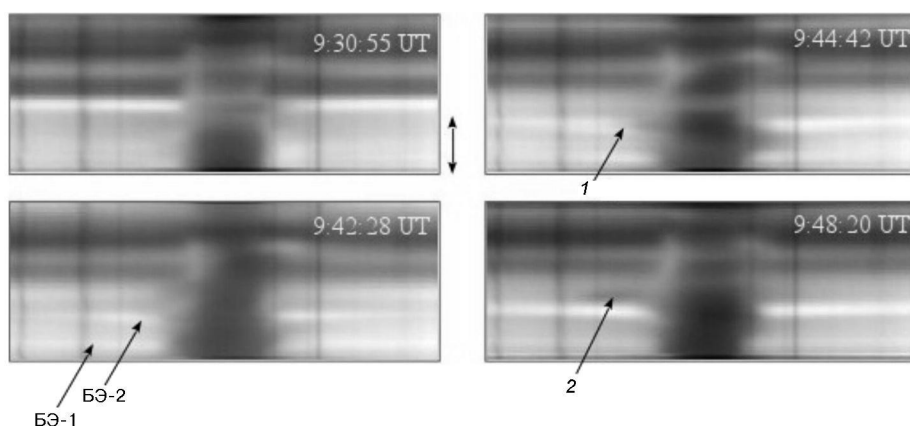


Рис. 2. H I-спектры АО, полученные в разные моменты наблюдений: БЭ-1 и БЭ-2 — бомбы Эллерамана, стрелкой отмечен исследуемый участок, цифрами 1, 2 обозначены хромосферные выбросы

фоне эмиссионной полосы в коротковолновом крыле линии H I виден небольшой выброс в поглощении. Известно, что бомбы Эллерамана часто сопровождаются сержами. На спектре, полученном в один из последних моментов наблюдения ( $9^{\text{h}}48^{\text{m}}20^{\text{s}}$  UT), можно видеть уже только БЭ-2 и серж около нее.

#### ИЗМЕНЕНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ ЛИНИИ H I И ЛУЧЕВЫХ СКОРОСТЕЙ

В работе были использованы профили параметра Стокса  $I$ , полученные по спектрам с интервалом, соответствующим расстоянию 160 км на поверхности Солнца.

**Изменения интенсивности.** На рис. 3, а и б приведены примеры профилей линии H I для двух бомб Эллерамана, относящиеся к разным стадиям их развития. Видно, что форма профилей очень разнообразна, они состоят из нескольких компонентов — широких профилей излучения в крыльях линии H I и профиля поглощения в центре линии. Профили асимметричны по интенсивности и протяженности крыльев, при этом абсорбционные профили за время развития БЭ изменяли свою ширину. На рис. 3, а приведены профили линии H I для БЭ-1. Профиль 1 показан для сравнения, он получен для участка АО без активных образований и вне области выходящего магнитного потока. У профиля 2, полученного по спектру одного из первых моментов наблюдений ( $9^{\text{h}}30^{\text{m}}56^{\text{s}}$  UT), интенсивность в крыльях увеличена примерно на 13 % по сравнению с профилем 1. На расстоянии 0.1 нм от ядра линии в красном (длинноволновом) крыле хорошо виден пик интенсивности — эмиссионный компонент профиля. У профиля 3 (спектр получен через 9 мин, в  $9^{\text{h}}40^{\text{m}}04^{\text{s}}$  UT) сильно увеличилась полуширина — от 0.11 нм до 0.15 нм. Из сравнения профилей 2 и 3 можно видеть, что при увеличении интенсивности в крыльях интенсивность в ядре линии уменьшилась. Также видно, что увеличение интенсивнос-

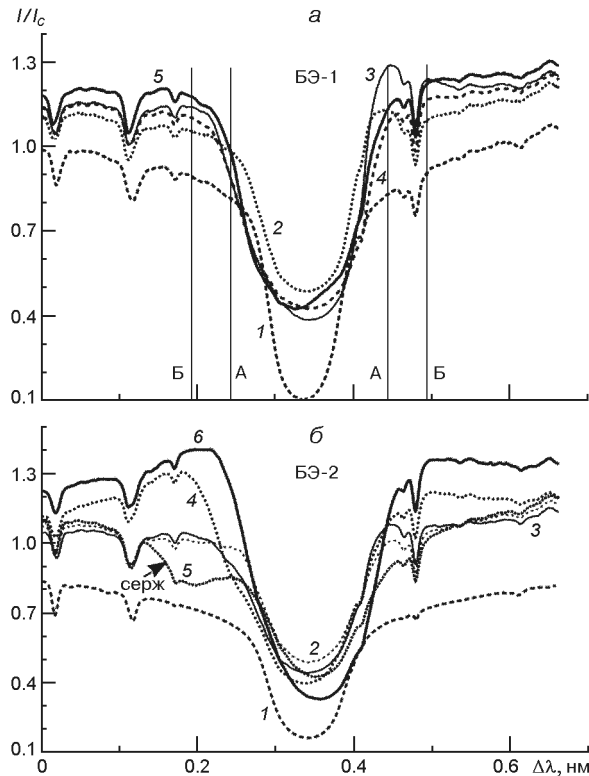


Рис. 3. Профили линии Н : а — для БЭ-1 (профили 2—4 — для разных моментов наблюдений (см. текст), профиль 1 — для участка АО без активных образований и вне области выходящего магнитного потока); б — для БЭ-2 (профили 2—5 — для разных моментов наблюдений, 1 — профиль линии Н для спокойного Солнца [15]). Вертикальные линии А и Б — места фотометрических разрезов поперек спектров на расстоянии  $\pm 0.1$  и  $\pm 0.15$  нм от центра линии

ти в синем (коротковолновом) крыле постепенно распространялось вдоль крыла. Кроме того, в красном крыле, помимо роста интенсивности вдоль крыла, образовался пик интенсивности на расстоянии 0.11 нм от центра ядра линии, как и у профиля 2. Профиль 4 (спектр получен через 34 с) — самый широкий, его полуширина равна 0.17 нм, при этом в красном крыле на расстоянии 0.12 нм от центра линии пик интенсивности уже еле заметен. Наибольшая интенсивность в синем крыле получена у профиля 5 (момент наблюдений  $9^h 42^m 45^s$  UT). Его ядро несимметрично и сдвинуто в синюю сторону, в то же время в красном крыле интенсивность увеличилась в более дальней части крыла. К концу наблюдений ширина профилей и интенсивность в синем крыле начала уменьшаться, а в дальнем красном крыле, на расстоянии 0.24 нм от ядра линии, интенсивность продолжала увеличиваться.

На рис. 3, б приведены профили линии Н для БЭ-2, для сравнения дан профиль линии Н из атласа Дельбюля и др. [15] для спокойного Солнца (профиль 1). Видно, что в течение наблюдений величина интенсивности в крыльях линии в спектрах БЭ-2 изменялась больше,



чем в спектрах БЭ-1. Профиль 2 (момент наблюдений в  $9^h35^m57^s$  UT) относится к началу развития БЭ-2, когда яркость в крыльях линии только начала увеличиваться, его полуширина такая же, как у профиля 1. У профиля 3 (спектр получен через  $5^m20^s$ , в  $9^h41^m17^s$  UT) увеличилась интенсивность в крыльях и уменьшилась в ядре, увеличилась ширина профиля, в красном крыле есть эмиссионный пик интенсивности на расстоянии 0.11 нм от ядра линии, тогда как максимум интенсивности достигается в более дальней части крыла. У профиля 4 (наблюдение в  $9^h44^m02^s$  UT, в это время начал развиваться первый серж) сильно увеличена интенсивность как в синем (максимум интенсивности находился на расстоянии 0.17 нм от ядра линии), так и в красном крыле. Профиль еще больше уширился, его полуширина, по сравнению с профилем 2, увеличилась от 0.13 нм до 0.15 нм. Надо заметить, что уширение профилей происходило за счет сдвига синего крыла в коротковолновую сторону. Профиль 5 (спектр получен в  $9^h48^m17^s$  UT) имел два абсорбционных компонента — основной (БЭ-2) и, смещенный в синюю сторону, который соответствовал второму выбросу. По смещению этого компонента были определены  $V_{\text{луч}}$  в области выброса. Профиль 6 (спектр получен в последний момент наблюдений в  $9^h49^m34^s$  UT) обнаруживает наибольшую эмиссию в крыльях. У этого профиля самое широкое ядро и вся линия сильно сдвинута в красную сторону. Видно также, что он асимметричный — синее крыло более интенсивное, максимум интенсивности достигается на расстоянии 0.15 нм от центра линии. Заметим, что в начале развития БЭ-2 более интенсивным было красное крыло, а к концу наблюдений — синее.

Рис. 3 показывает, как сильно изменялась форма профилей, относящихся к разным стадиям эволюции бомб Эллермана. При этом изменения в длинноволновом и коротковолновом крыльях линии происходили несимметрично. В работах [5, 19, 26] было высказано предположение, что асимметрия крыльев профилей линий может быть следствием различий структуры магнитного поля, распределения плотности и температуры на пути потоков, движущихся в разные стороны. Так, один поток плазмы направлен в сторону увеличения плотности, а другой — в сторону уменьшения.

На рис. 4, *a* и *б* приведены изменения интенсивности вдоль щели спектрографа в крыльях линии H на расстоянии  $\pm 0.1$  нм и  $\pm 0.15$  нм от ее центра в разные моменты наблюдений (разрезы А и Б на рис. 3, *a*). Отметим, что в большинстве работ по изучению свойств БЭ указано, что максимум интенсивности в крыльях линии H достигается на расстоянии  $\pm 0.1$  нм от центра линии. В нашем случае разрез А в синем крыле приходится на внутреннюю часть крыла линии, а разрез Б — на его внешнюю часть. В начале наблюдений (моменты  $9^h31^m36^s$  и  $9^h33^m01^s$  UT) на спектрах, относящихся к области образования бомб Эллермана, начала увеличиваться интенсивность в крыльях линии H (кривые 1к и 1с на рис. 4, *a*), причем в красном крыле она была значительно больше, чем в синем. В работах [16, 36] отмечено, что бомбы Эллермана появляются в местах повышенной яркости. Действитель-

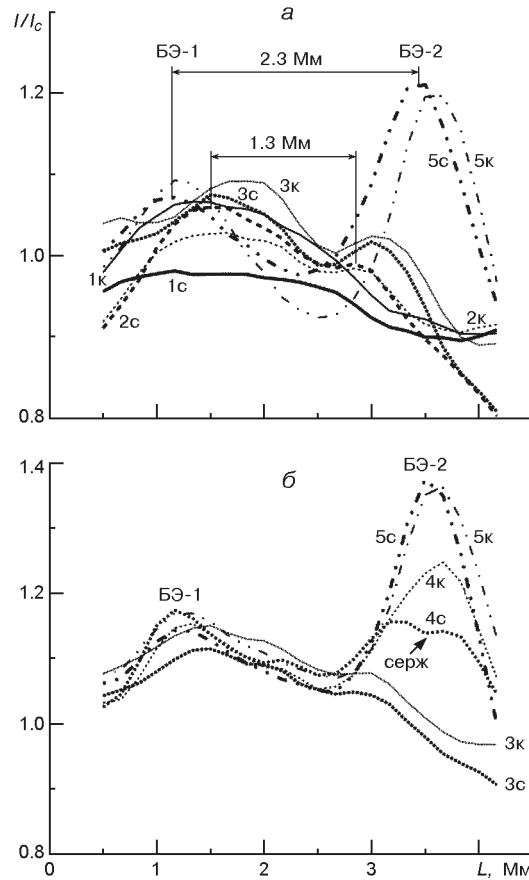
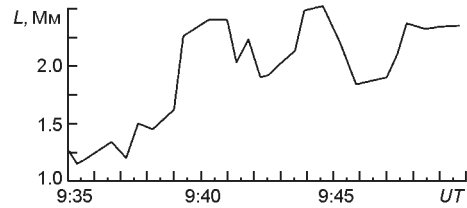


Рис. 4. Изменение интенсивности вдоль щели спектрографа в крыльях линии Н на расстоянии  $\pm 0.1$  нм (а) и  $\pm 0.15$  нм (б) от ее центра в разные моменты наблюдений. Кривые 1с—5с и 1к—5к относятся к синему и красному крыльям и соответствуют пяти моментам времени  $9^h 31^m 36^s$ ,  $9^h 35^m 32^s$ ,  $9^h 37^m 11^s$ ,  $9^h 44^m 42^s$ ,  $9^h 48^m 20^s$  UT

но, после момента  $9^h 35^m 32^s$  UT на кривых интенсивности (2к и 2с) начали четко выделяться два максимума, соответствующие развивающимся бомбам Эллермана. В этот момент наблюдений более интенсивным было синее крыло, и разность интенсивностей крыльев была небольшой. Надо заметить, что БЭ образовались в областях межгранульных промежутков. Идентификация гранул и межгранульных промежутков была выполнена ранее в работе [28]. В работе [25] высказано предположение, что появление бомб Эллермана, вероятно, связано с сильными магнитными полями внутри межгранульных полос. Кривые 3к, 3с и 5к, 5с показывают, что к концу наблюдений интенсивность в крыльях линии Н в области образования БЭ-2 сильно увеличилась и стала значительно большей, чем в области образования БЭ-1. Видно, что максимумы интенсивности в синем и красном крыле немного сдвинуты друг относительно друга. Стрелками показано, что расстояние  $L$  между бомбами Эллермана увеличилось за время наблюдений от 1.3 Мм в  $9^h 35^m 30^s$  UT до 2.3 Мм в  $9^h 48^m 20^s$  UT.

Рис. 5. Изменение со временем расстояния между БЭ-1 и БЭ-2



Однако, как видно из рис. 5, изменение расстояния между бомбами Эллерамана происходило не равномерно, а носило колебательный характер с периодом около 4 мин. Наименьшее значение  $L = 1.15$  Мм было около  $9^h36^m$  UT. Затем оно начало резко увеличиваться, и в период наблюдений  $9^h40^m - 9^h41^m$  UT составляло 2.4 Мм, а в период  $9^h44^m - 9^h44^m40^s$  UT оно было наибольшим за время наблюдений ( $L = 2.52$  Мм). К концу наблюдений ( $9^h47^m40^s - 9^h49^m30^s$  UT) значение  $L$  уменьшилось до 2.35 Мм. Позже мы увидим, что во время увеличения  $L$  происходили выбросы хромосферного вещества (сержи).

Эти результаты согласуются с данными других работ. Так, в работе [44] найдено, что среднее расстояние между компонентами в паре составляет 2.2 Мм. В работе [25] описаны две магнитные яркие точки, разделенные расстоянием около 2.7 Мм. Они двигались в противоположных направлениях со скоростью 2.8 км/с, и когда расстояние между ними увеличилось до 4.4 Мм, в линии H стали наблюдаться бомбы Эллерамана.

На рис. 4, б приведены изменения вдоль щели спектрографа интенсивности в крыльях линии H на расстоянии  $\pm 0.15$  нм от ее центра. Видно, что величина интенсивности как в синем, так и в красном крыле достигла больших значений, но разность между ними была меньшей, чем для случая  $\pm 0.1$  нм. В основном закономерности изменения интенсивности для обоих расстояний были очень похожими. Однако четкое выделение максимумов, соответствующих бомбам Эллерамана, произошло позже, приблизительно к моменту  $9^h37^m10^s$  UT (см. кривые 3к и 3с). На кривой 4с, относящейся к моменту времени  $9^h44^m42^s$  UT (см. также на рис. 2), уменьшение интенсивности в области БЭ-2 соответствует хромосферному выбросу.

На рис. 6, а и б показаны временные изменения интенсивности эмиссии линии H в коротковолновом (1с и 2с) и длинноволновом (1к и 2к) крыле на расстоянии 0.1 нм (1с и 1к) и 0.15 нм (2с и 2к) от ее центра, а также в центре линии (кривые 3). Видно, что при увеличении интенсивности в крыльях линии интенсивность в ее центре или не изменялась (БЭ-1), или немного уменьшалась (БЭ-2). Данный факт можно интерпретировать как свидетельство того, что магнитные пересоединения, приведшие к образованию бомб Эллерамана, происходили ниже слоя хромосферы, в котором образуется ядро линии H. Чем глубже в атмосфере Солнца находится область пересоединения, тем больше энергии передается в нижние слои атмосферы, где образуются крылья линии H. При этом меньшая часть энергии переходит в более высокие хромосферные слои, в область, где генерируется ядро линии. От-

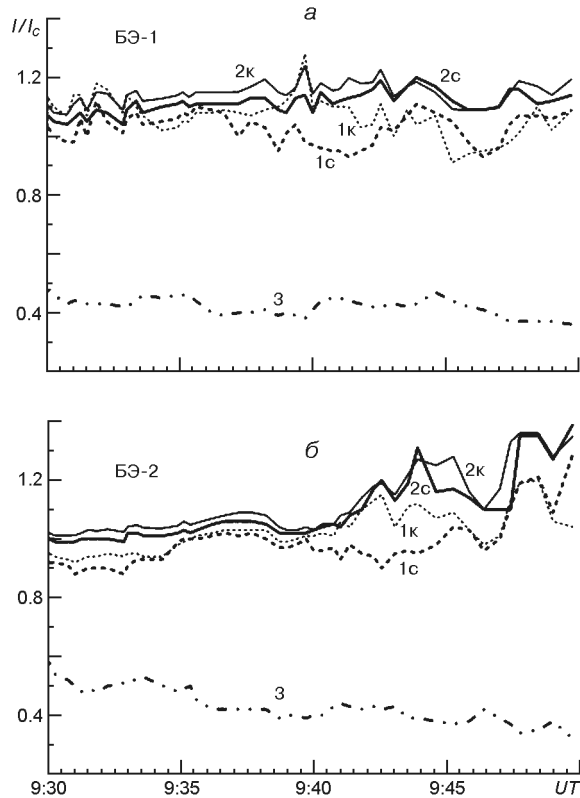


Рис. 6. Изменение со временем интенсивности эмиссии в крыльях линии Н на расстоянии  $\pm 0.1$  нм и  $\pm 0.15$  нм от ее центра: кривые 1, 3 — в коротковолновом крыле, 2, 4 — в длинноволновом крыле, 5 — в центре линии (а — в области БЭ-1, б — в области БЭ-2)

метим, что такое же соотношение в изменении интенсивности в крыле и ядре линии было получено в работах [22, 23]. Из рис. 6 видно, что изменения интенсивности в крыльях происходили асимметрично с избытком эмиссии в красном крыле. Как правило, у большинства бомб Эллермана более интенсивным бывает синее крыло, но, как показано в работе [18], у некоторых БЭ избыток интенсивности в красном крыле равен или даже больше, чем в синем крыле. Для объяснения было высказано предположение, что это связано с динамическими процессами, происходящими во время образования и развития БЭ.

Временные кривые изменения интенсивности у БЭ-1 имеют три периода увеличения яркости, которые хорошо видны на всех кривых, причем каждый из этих периодов состоит из нескольких индивидуальных пиков. Так период увеличения интенсивности, который длился около 3 мин ( $9^h 31^m 40^s$  —  $9^h 34^m 20^s$  UT), имел три максимума с интервалом в 1 мин ( $9^h 32^m$ ,  $9^h 33^m$  и в  $9^h 34^m$ ), хорошо заметные как в синем, так и в красном крыле. Надо заметить, что интенсивность в синем крыле достигала максимума на 10 — 25 с раньше, чем в красном. Следующий период ( $9^h 37^m 40^s$  —  $9^h 45^m 20^s$  UT) состоял из пяти пиков, наблюдавшихся с интервалом от 1 до 2 мин, причем в красном крыле самым высоким был пик с максимумом интенсивности в  $9^h 40^m 05^s$ , а в синем

крыле высокими были два пика, в которых максимумы интенсивности достигались в  $9^h42^m45^s$  и  $9^h44^m05^s$ . Последний период начался в  $9^h47^m$  UT и состоял из двух пиков с интервалом около 2 мин. Пронаблюдать его полностью не удалось, так как в  $9^h50^m$  UT закончились наблюдения. Такие особенности в изменении интенсивности в крыльях линии H являются свидетельством того, что выделение энергии во время БЭ-1 было импульсным.

На кривых изменения яркости БЭ-2 также выделяются три периода увеличения интенсивности в крыльях линии H. При этом в первый период, который продолжался 4 мин ( $9^h35^m$  —  $9^h39^m$  UT), изменения интенсивности имеют плавный ход, а второй и третий периоды, как и в случае БЭ-1, состоят из нескольких индивидуальных пиков. Это свидетельствует о том, что во время БЭ-2 происходило как импульсное, так и постепенное выделение энергии. Второй период длительностью около 5 мин ( $9^h41^m$  —  $9^h46^m30^s$  UT) имел три максимума с интервалами около 1.5 и 1 мин. Третий период начался около  $9^h47^m$  UT и полностью совпадал по времени достижения максимумов интенсивности с соответствующим периодом у БЭ-1.

То, что во время развития исследованных нами бомб Эллермана наблюдалось как импульсное, так и постепенное выделение энергии, согласуется с результатами работ [19, 44], а также с выводами, сделанными в работах [26, 27, 35, 37], о том, что бомбы Эллермана возникают в результате последовательных и прерывистых магнитных пересоединений в нижней хромосфере или в верхней фотосфере.

**Лучевые скорости.** Как известно, профиль линии H для бомб Эллермана состоит из нескольких компонентов: поглощения в центре линии и эмиссии в крыльях линии. Каждый из этих компонентов имеет свой доплеровский сдвиг, по которому можно определить скорость вещества в слоях хромосферы, где они образуются [10, 13, 26]. Численное моделирование показало, что варьируя такие физические параметры, как температура, плотность и скорость движения вещества, можно получить хорошее согласие вычисленных профилей с наблюдаемыми. При этом особо важную роль играет изменение поля скоростей с высотой в хромосфере, которое контролирует сдвиги и асимметрию H-профилей.

В нашей работе лучевые скорости ( $V_{\text{луч}}$ ) хромосферного вещества на уровне образования ядра линии H определялись по доплеровским смещениям ядра линии в спектрах относительно его положения в лабораторном спектре с использованием близлежащих теллурических линий. При этом учитывались все необходимые поправки [4, 28]. Погрешность определения  $V_{\text{луч}}$  составляла 0.3 км/с.

На рис. 7, а, б, в приведены временные изменения хромосферной лучевой скорости, определенные по смещению ядра линии H, в центральной части бомб Эллермана и на расстоянии 0.33 Мм от нее, а также на участке АО между БЭ-1 и БЭ-2. Для сравнения показаны определенные нами изменения лучевой скорости на участке АО без активных образований в период наших наблюдений.

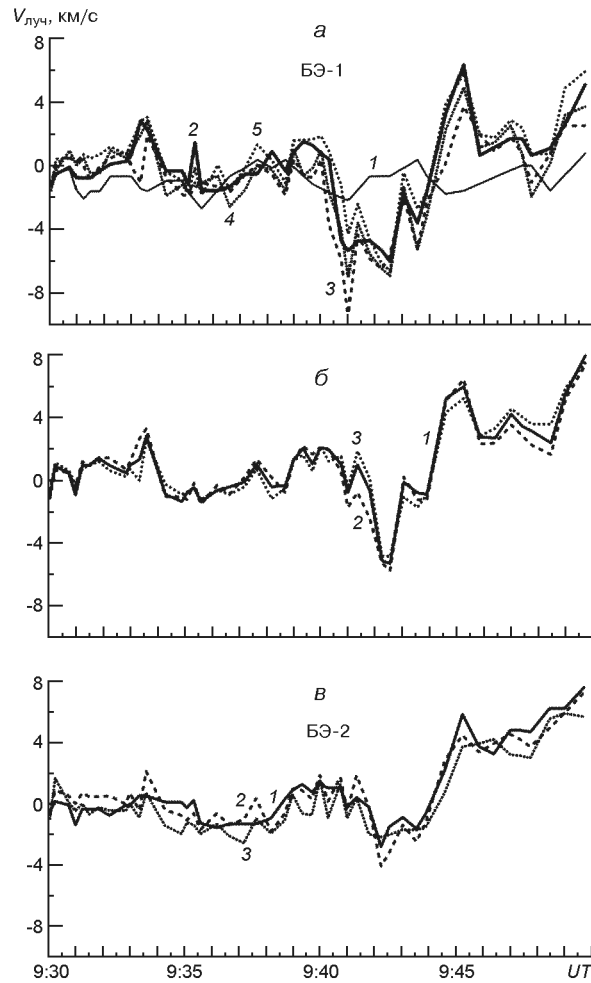


Рис. 7. Изменение со временем хромосферной лучевой скорости плазмы, определенной по сдвигу ядра линии Н : а — в центральной части БЭ-1 и на расстоянии 0.33 Мм от нее (кривые 2—5); 1 — изменения лучевой скорости на соседнем участке АО без активных образований; б — на участке АО между БЭ-1 и БЭ-2; в — в центральной части БЭ-2 и на расстоянии 0.33 Мм от нее. Отрицательные значения лучевой скорости соответствуют движению к наблюдателю

На участке АО без активных образований и вне области выходящего магнитного потока хромосферное вещество на уровне образования ядра линии Н двигалось в основном к наблюдателю, значения его скорости находились в пределах от 0.4 до  $-2.2$  км/с, изменения скорости происходили с периодом около 4 мин (рис. 7, а, кривая 1).

На кривых временного хода лучевой скорости для БЭ-1 выделены два периода, в течение которых значения скорости, направленные к наблюдателю и от него заметно превышали значения  $V_{\text{луч}}$  на кривой 1 (рис. 7, а). Необходимо заметить, что в начале наблюдений, около  $9^{\text{h}}34^{\text{m}}$  UT, в течение одной минуты происходило движение ве-

щества вниз со скоростью, достигавшей 3 км/с, что, возможно, было связано с магнитными пересоединениями, происходившими в период времени  $9^h31^m40^s$  —  $9^h34^m20^s$  UT. В более поздний период времени ( $9^h40^m20^s$  —  $9^h44^m20^s$  UT) были видны три пика увеличения скорости движения вещества к наблюдателю. В течение минуты скорость резко увеличилась от 0.5 км/с в  $9^h40^m20^s$  UT до  $-9.3$  км/с в  $9^h41^m15^s$  UT. Второй пик был приблизительно через 1.5 мин, максимальная скорость в нем достигла  $-7.0$  км/с, и третий пик наблюдался еще через одну минуту, с максимальной скоростью  $-5.2$  км/с. После этого скорость движения вещества вверх стала резко уменьшаться, и в  $9^h44^m20^s$  UT движение вверх сменилось движением вниз, при этом скорость в течение минуты резко увеличилась до 6.5 км/с. Затем произошло уменьшение лучевой скорости до 0 км/с, а к концу наблюдений она опять увеличилась до 6.0 км/с. Заметим, что скорость подъема хромосферного вещества уменьшалась от внешней границы БЭ к внутренней, а скорость опускания в этом направлении — наоборот, увеличивалась.

В области участка АО, находящегося между бомбами Эллера (возможно, это была вершина магнитной петли, у оснований которой и развились исследуемые две БЭ) изменения  $V_{\text{луч}}$  со временем носили колебательный характер с периодом около 3 мин. В периоды времени  $9^h31^m50^s$  —  $9^h34^m40^s$  UT и  $9^h37^m40^s$  —  $9^h41^m10^s$  UT происходило опускание хромосферного вещества с лучевыми скоростями, достигавшими 3.3 и 2.2 км/с соответственно. В периоды времени  $9^h34^m40^s$  —  $9^h37^m40^s$  UT и  $9^h41^m10^s$  —  $9^h44^m00^s$  наблюдался подъем вещества, но в первый период  $V_{\text{луч}}$  не превышала  $-1$  км/с, а увеличение скорости во второй период имело три максимума: в  $9^h41^m20^s$ , через 1.5 мин и через 1 мин ( $V_{\text{луч}} = -1.7, -5.8$  и  $-1.8$  км/с соответственно). Видно, что максимумы  $V_{\text{луч}}$  достигались примерно на 10 с позже, чем в области БЭ-1, и значения их были меньше. Это говорит о том, что возбуждение распространялось вдоль петли из области БЭ-1. В  $9^h44^m10^s$  UT значения скорости изменили знак, и до конца наблюдений (около 6 мин), происходило опускание плазмы. В этот период тоже выделились три пика: в  $9^h45^m20^s$ , через 1.5 мин и через 2.5 мин с ( $V_{\text{луч}} = 6.5, 4.6$  и  $8$  км/с соответственно).

В области БЭ-2 до  $9^h36^m$  UT происходили небольшие колебания значений  $V_{\text{луч}}$  около нуля, в моменты времени  $9^h31^m10^s$  и  $9^h34^m20^s$  UT скорость движения вещества от наблюдателя увеличивалась до 2 км/с. Затем наблюдались два трехминутных периода с  $9^h36^m$  до  $9^h39^m$  и с  $9^h39^m$  и до  $9^h42^m$  UT. В течение первого периода хромосферное вещество поднималось вверх с небольшой скоростью около  $-2.0$  км/с, а в течение второго  $V_{\text{луч}}$  изменялась в пределах от  $-1$  до 1.5 км/с. Период подъема вещества с  $9^h42^m$  до  $9^h44^m30^s$  UT имел два максимума увеличения скорости: до  $-4.0$  и  $-2.5$  км/с. Видно, что значения максимальной скорости стали еще меньше. Около  $9^h44^m10^s$  UT значения  $V_{\text{луч}}$  изменили знак, в  $9^h44^m20^s$  UT скорость достигла 5.8 км/с, и уже до конца наблюдений в этом месте вещество только опускалось, лучевая скорость увеличилась до 7.7 км/с.

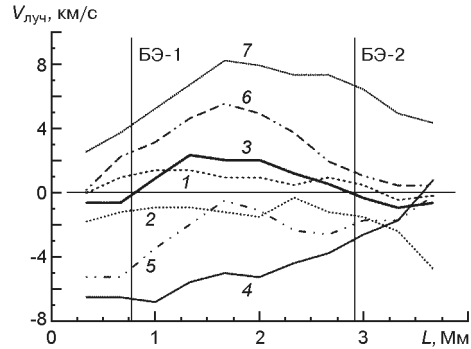
Полученные нами временные изменения интенсивности линии Н (рис. 6) и лучевой скорости движения хромосферного вещества в областях бомб Эллермана (рис. 7) указывают на то, что они возникли и развивались как физически связанная пара. В работе [44] высказано предположение, что такие бомбы Эллермана образуются в основаниях компактных магнитных петель. Действительно, можно проследить, как возбуждение распространилось из области образования БЭ-1 в область образования БЭ-2, т. е. из одного основания петли, где развилась БЭ-1 через вершину петли ко второму ее основанию в области развития БЭ-2. Напомним, что исследуемый нами участок АО находился в области выходящего магнитного потока [40]. Вероятно, в результате взаимодействия всплывающей магнитной петли с уже существующим магнитным полем или соседней петлей серпантинного магнитного поля произошли последовательные магнитные пересоединения в верхней фотосфере или нижней хромосфере (в области развития БЭ-1) в период с  $9^h37^m40^s$  до  $9^h45^m20^s$  UT (рис. 6). Потоки плазмы, идущие вверх от места пересоединений, вызвали увеличение лучевой скорости хромосферного вещества на уровне образования ядра линии Н в период  $9^h40^m20^s$  —  $9^h44^m20^s$  UT, который состоял из трех индивидуальных пиков с интервалами 1.5 и 1 мин (рис. 7). Известно, что БЭ могут генерировать периодические колебания скорости вдоль петли и вызывать повторные пересоединения [25]. Таким образом, возбуждение распространилось из области БЭ-1, о чем свидетельствует уменьшение скорости (рис. 7), и вызвало магнитные пересоединения в области развития БЭ-2 в период времени с  $9^h41^m$  до  $9^h46^m30^s$ , который тоже состоял из трех пиков с теми же интервалами 1.5 и 1 мин (рис. 6).

Мы определили также лучевые скорости хромосферного вещества по положению пиков интенсивности (эмиссионных компонентов) в крыльях линии Н. На рис. 3 пики интенсивности хорошо видны на профилях 2, 3 для БЭ-1 и на профилях 3, 4 для БЭ-2. Необходимо заметить, что у профилей для БЭ-1 пик интенсивности появлялся в красном крыле линии, а у профилей для БЭ-2 — в синем крыле. Эмиссионные пики выделялись не на всех профилях, а только полученных для некоторых моментов наблюдений. Эмиссионный пик в красном крыле профилей БЭ-1 был виден в самом начале наблюдений в течение 2 мин, в период времени  $9^h31^m$  —  $9^h33^m$  UT, и позднее в течение 25 с — с  $9^h39^m40^s$  до  $9^h40^m05^s$  UT. Смещение этого пика соответствовало лучевой скорости 50 км/с. В синем крыле профилей БЭ-2 эмиссионный пик периодически появлялся после  $9^h41^m15^s$  UT, его доплеровский сдвиг соответствовал  $V_{\text{луч}} = -60 \dots -80$  км/с. Полученные результаты свидетельствуют о том, что в области развития бомб Эллермана в некоторые периоды их эволюции наблюдались нисходящий и восходящий потоки с большими скоростями.

Были исследованы также особенности изменений лучевой скорости хромосферного вещества в окрестностях бомб Эллермана. На рис. 8 представлено изменение  $V_{\text{луч}}$  вдоль участка АО, вырезанного щелью спектрографа, в разные моменты наблюдений. Кривая 1 показывает,



Рис. 8. Изменение хромосферной лучевой скорости вдоль участка АО, вырезанного щелью спектрографа, в разные моменты наблюдений:  $9^h33^m43^s$ ,  $9^h35^m32^s$ ,  $9^h39^m43^s$ ,  $9^h42^m30^s$ ,  $9^h43^m42^s$ ,  $9^h44^m42^s$ ,  $9^h49^m34^s$  UT (кривые 1—7 соответственно). Вертикальные линии указывают среднее положение бомб Эллермана



что в это время по всей площади участка вещество опускалось с небольшой скоростью около 1 км/с, а до этого происходили колебания скорости, не превышающие  $\pm 1.5$  км/с. Примерно через две минуты (кривая 2) направление движения хромосферного вещества изменилось, и на всем участке наблюдался восходящий поток ( $V_{\text{луч}} -1$  км/с). Из кривой 3 видно, что бомбы Эллермана находились в области, где происходило изменение знака доплеровских скоростей. На кривой 4 видно, что в это время на всем участке вещество двигалось вверх, при этом наибольшая скорость (до  $-7$  км/с) наблюдалась в области БЭ-1, в области же БЭ-2 значения  $V_{\text{луч}}$  были более чем в два раза меньше. Кривая 5 показывает, что к этому моменту наблюдений скорость движения вещества вверх на всем участке уменьшилась до  $-5.3$  и  $-2.6$  км/с в областях БЭ-1 и БЭ-2 соответственно, а в области между бомбами Эллермана — до  $-0.5$  км/с. Через минуту (кривая 6) направление  $V_{\text{луч}}$  на всем участке изменилось: с наибольшей скоростью до 5.5 км/с хромосферное вещество опускалось в области между БЭ, и с меньшей скоростью — в области бомб Эллермана. К концу наблюдений произошло резкое увеличение скорости опускания на всем исследуемом участке до 4.5 и 7.3 км/с в областях БЭ-1 и БЭ-2 соответственно, а между ними — до 8.3 км/с.

Анализ изменений хромосферной лучевой скорости на исследуемом участке АО показал, что за время наблюдений направление движения вещества изменялось три раза с интервалом около 5 мин: около  $9^h34^m30^s$ ,  $9^h39^m15^s$  и  $9^h44^m20^s$  UT. При этом изменения значения скорости и направления движения вещества происходили синхронно на всем участке. Возможно, они были вызваны выходом нового магнитного потока. В окрестностях бомб Эллермана вещество двигалось с меньшей скоростью, чем в областях самих бомб Эллермана. При этом наибольшие изменения скорости движения вещества происходили в области между бомбами Эллермана от  $-5.3$  до 8.3 км/с. Наименьшие изменения  $V_{\text{луч}}$  наблюдались в окрестности БЭ-2. Необходимо заметить, что величина лучевой скорости хромосферного вещества от наблюдателя имела большие значения между БЭ, чем в областях бомб Эллермана. Возможно, это было связано со структурой магнитного поля исследуемого участка АО. Подобные результаты изменения ско-

рости на участке АО с развивающимися бомбами Эллермана были получены в работах [2, 14]. В работе [2] по спектрограммам в линии Н были определены хромосферные лучевые скорости в окрестностях шести БЭ. Было получено, что над пятью БЭ вещество опускалось со скоростью от 2 до 10 км/с, и только над одной БЭ наблюдался подъем со скоростью 1 км/с, вблизи БЭ скорость опускания доходила до 17 км/с. В работе [14] получены восходящие потоки с большой скоростью рядом с яркими БЭ, а также подчеркнута важная роль поля скоростей в окрестностях БЭ в их образовании и развитии.

**Скорость горизонтального движения БЭ.** Изменение расстояния между бомбами Эллермана происходило в результате их горизонтального движения. На рассматриваемом нами участке активной области находились две поры, что дало возможность определить скорость горизонтального движения бомб Эллермана относительно них. Как одна, так и другая БЭ с периодом около 4 мин изменяла направление движения, то приближаясь, то удаляясь друг от друга. Скорость горизонтального движения БЭ за время наблюдений изменялась от 1 до 9 км/с. В работе [34] найдено, что горизонтальное движение БЭ происходило со скоростью около 1.1 км/с, а в [25] со скоростью 2.8 км/с, что согласуется с нашими результатами.

Важность горизонтальных движений плазмы для образования и развития бомб Эллермана подчеркнута во многих теоретических работах [19, 36, 42]. Моделирование показало, что под действием горизонтальных потоков нарушается стабильность магнитной конфигурации, что может вызвать магнитные пересоединения.

**Выбросы.** Исследованные в данной работе бомбы Эллермана сопровождались несколькими небольшими выбросами хромосферного вещества (сержами), они были кратковременными — около 0.5 — 1.5 мин. В области БЭ-1 произошло два выброса: в  $9^h37^m40^s$  —  $9^h39^m05^s$  и в  $9^h46^m25^s$  —  $9^h47^m$  UT. Рис. 5 показывает, что во время первого выброса резко увеличилось расстояние между бомбами Эллермана, а подъем сменился опусканием вещества (рис. 7). Во время обоих выбросов произошло резкое увеличение яркости БЭ-1 (рис. 6). В области БЭ-2 за время наблюдений произошло четыре выброса. Во время первого выброса (около  $9^h43^m$  UT) увеличилось расстояние между бомбами Эллермана, а также резко увеличились лучевая скорость и яркость БЭ. На спектре, полученном в  $9^h44^m42^s$  UT, на фоне эмиссионной полосы в коротковолновом крыле линии Н хорошо виден выброс в поглощении (рис. 2): в это время наблюдался один из пиков увеличения яркости БЭ и изменение направления лучевой скорости. Третий выброс в области БЭ-2 произошел одновременно со вторым выбросом в области БЭ-1, в это время регистрировался один из пиков увеличения яркости. Четвертый выброс произошел возле БЭ-2 (рис. 2, спектр был получен в  $9^h48^m20^s$  UT), максимальная скорость в нем составила –70 км/с. Известно, что одним из признаков магнитного пересоединения является образование сержей [18, 31, 32, 44]. В данной работе мы получили, что в это же время происходило увеличение расстояния

между БЭ, увеличение их яркости и скорости хромосферного вещества. Возможно, что под действием горизонтальных потоков (о чем свидетельствует изменение расстояния между бомбами Эллера) происходили последовательные магнитные пересоединения, что вызывало увеличение яркости бомб Эллера и лучевой скорости хромосферного вещества, а также образование сержей.

**Тонкая структура.** Работы [19, 32], посвященные изучению внутренней структуры ярких точек в линии Ca II H, отождествленных с бомбами Эллера с помощью H-изображений, полученных в крыльях линии ( $\pm 0.08$  нм от центра), показали, что они состоят из двух частей: центрального удлиненного яркого ядра, расположенного вдоль нейтральной линии магнитного поля и диффузного гало. Было найдено, что субкомпоненты имеют меньший размер, чем типичный размер БЭ и продолжительность их жизни меньше, чем типичный срок жизни БЭ. Такую структуру бомб Эллера авторы объясняют тем, что пересоединение между уже существующим полем и выходящим магнитным потоком противоположной полярности не происходит непрерывно, а в виде нескольких элементарных магнитных пересоединений, происходящих один за другим пространственно рядом друг с другом, что и вызывает выброс струеподобных субкомпонентов.

На наших спектрах БЭ-2, полученных во время резкого повышения интенсивности в синем крыле линии H с  $9^h 41^m$  до  $9^h 45^m$  UT, хорошо видна подобная тонкая структура. Как показывает рис. 6, эти спектры были получены во время импульсного выделения энергии — происходили магнитные пересоединения. На рис. 9 представлено распределение интенсивности вдоль щели спектрографа в синем крыле линии H на расстоянии 0.1 нм от ее центра. Кривая 1 относится к спектру, полученному в  $9^h 39^m 43^s$  UT, на ней изменение интенсивности происходит плавно. Пики интенсивности, соответствующие БЭ-2 на остальных кривых, состоят из основного компонента и одного (кривые 4 и 5) или двух (кривые 2 и 3) субкомпонентов. Полученные нами результаты по спектрам БЭ-2 в линии H хорошо согласуются с выводами, сделанными в работах [19, 32] на основе изучения бомб Эллера в линии Ca II H.

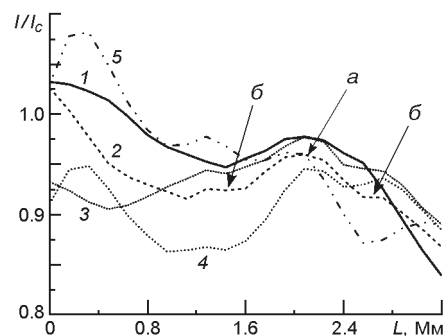


Рис. 9. Тонкая структура БЭ-2: 1—5 — изменение интенсивности вдоль щели спектрографа в синем крыле линии H на расстоянии 0.1 нм от ее центра в разные моменты наблюдений: а — основной компонент, б — субкомпоненты

**ВЫВОДЫ**

Исследуемые бомбы Эллермана развились в молодой активной области NOAA 11024, которая в день наших наблюдений, 4 июля 2009 г., находилась на стадии резкого роста активности. Две БЭ образовались в области одного из трех выходящих в это время магнитных потоков, в месте повышенной яркости, в межгранульных промежутках. Профили линии H $\beta$  были асимметричными по протяженности и интенсивности крыльев, в основном с избытком эмиссии в длинноволновом крыле. Расстояние между бомбами Эллермана увеличилось за время наблюдений от 1.3 до 2.3 Мм, его изменение происходило не равномерно, а с периодом около 4 мин. Скорость горизонтального движения бомб Эллермана изменялась от 1 до 9 км/с.

Изменение интенсивности в крыльях линии H $\beta$  на расстоянии  $\pm 0.1$  нм и  $\pm 0.15$  нм от ее центра указывает на то, что во время развития БЭ происходило как постепенное, так и импульсное выделение энергии. При увеличении интенсивности в крыльях линии интенсивность в ее центре или не изменялась (БЭ-1), или немного уменьшалась (БЭ-2).

На участке АО без активных образований временные изменения скорости хромосферного вещества на уровне образования ядра линии H $\beta$  происходили с периодом около 4 мин и находились в пределах 0.4...–2.2 км/с. Во время развития БЭ скорость к наблюдателю увеличилась до –9 км/с, а от наблюдателя — до 8 км/с. Периоды увеличения скорости состояли из трех индивидуальных пиков. В некоторые моменты наблюдались быстрые потоки плазмы вверх (до –80 км/с) и вниз (до 50 км/с).

За время наблюдений в области развития бомб Эллермана образовались небольшие выбросы хромосферного вещества, время их жизни составляло 0.5...1.5 мин.

Обнаружена тонкая структура бомб Эллермана на спектрах линии H $\beta$ , полученных в течение 4 мин во время резкого увеличения интенсивности в крыльях линии.

Особенности изменения интенсивности в крыльях линии H $\beta$  и скорости движения хромосферного вещества указывают на то, что исследованные в работе две бомбы Эллермана возникли и развивались как физически связанная пара.

Полученные нами данные поддерживают модель, в которой механизмом образования и развития бомб Эллермана являются последовательные магнитные пересоединения в верхней фотосфере или нижней хромосфере.

Выражаю благодарность Е. В. Хоменко и Р. И. Костыку за материалы наблюдений THEMIS и программы по их обработке.

1. Бабин А. Н. О размерах и яркости усов // Изв. Крым. астрофиз. обсерватории.—1978.—**58**.—С. 8—12.
2. Ден О. Е., Корниенко Г. И., Махмудов Ф. М., Михалина Ф. А. Структура хромосферы и лучевые скорости в окрестностях «усов» // Солн. данные.—1983.—№ 11.—С. 85—90.

3. Коваль А. Н. О движениях, связанных с усами // Изв. Крым. астрофиз. обсерватории.—1964.—**32**.—С. 32—37.
4. Пасечник М. Н. Движение плазмы в солнечной петле в выходящем магнитном потоке // Кинематика и физика небес. тел.—2014.—**30**, № 4.—С. 233—242.
5. Пикельнер С. Б. Природа точечных источников линейчатой, непрерывной и рентгеновской эмиссии на Солнце // Астрон. журн.—1974.—**51**, № 2.—С. 3—22.
6. Северный А. Б. Некоторые результаты исследования нестационарных процессов на Солнце // Астрон. журн.—1957.—**34**.—С. 684—693.
7. Северный А. Б. Исследование тонкой структуры эмиссии активных образований и нестационарных процессов на Солнце // Изв. Крым. астрофиз. обсерватории.—1957.—**17**.—С. 129—161.
8. Северный А. Б. Некоторые проблемы физики Солнца. — М.: Наука, 1987.—224 с.
9. Archontis V., Hood A. W. Formation of Ellerman bombs due to 3D flux emergence // Astron. and Astrophys.—2009.—**508**.—P. 1469—1483.
10. Bello Gonzalez N., Danilovic S., Kneer F. On the structure and dynamics of Ellerman bombs. Detailed study of three events and modelling of H  $\alpha$  // Astron. and Astrophys.—2013.—**557**.—P. 1—16.
11. Berlicki A., Heinzel P. Observations and NLTE modeling of Ellerman bombs // Astron. and Astrophys.—2014.—**567**.—P. 1—10.
12. Berlicki A., Heinzel P., Avrett E. H. Photometric analysis of Ellerman bombs // Mem. Soc. astron. ital.—2010.—**81**.—P. 646—652.
13. Bruzek A. Some observational results on moustaches // Solar Phys.—1972.—**26**, N 1.—P. 94—107.
14. Dara H. C., Alissandrakis C. E., Zachariadis T. G., et al. Magnetic and velocity field in association with Ellerman bombs // Astron. and Astrophys.—1997.—**322**.—P. 653—658.
15. Delbouille L., Roland G., Neven L. Photometric atlas of the solar spectrum from 3000 to 10000. — Liege: Institut d'Astrophysique, 1973.
16. Ding M. D., Henoux J.-C., Fang C. Line profiles in moustaches produced by an impacting energetic particle beam // Astron. and Astrophys.—1998.—**332**.—P. 761—766.
17. Ellerman F. Solar hydrogen “bombs” // Astrophys. J.—1917.—**46**.—P. 298—301.
18. Fang C., Tang Y. H., Xu Z., et al. Spectral analysis of Ellerman bombs // Astrophys. J.—2006.—**643**.—P. 1325—1336.
19. Georgoulis M. K., Rust D. M., Bernasconi P. N., et al. Statistics, morphology, and energetics of Ellerman bomb // Astrophys. J.—2002.—**575**.—P. 506—528.
20. Hashimoto Yu., Kitai R., Ichimoto K., et al. Internal fine structure of Ellerman bombs // Publ. Astron. Soc. Jap.—2010.—**62**.—P. 879—891.
21. Henoux J.-C., Fang C., Ding M. D. A possible mechanism for the H-alpha broad wings emission of Ellerman bombs // Astron. and Astrophys.—1998.—**337**.—P. 294—298.
22. Herlender M., Berlicki A. Spectrophotometric analysis of an Ellerman bomb // Cent. Eur. Astrophys. Bull.—2010.—**34**—P. 65—72.
23. Herlender M., Berlicki A. Multi-wavelength analysis of Ellerman bomb light curves // Cent. Eur. Astrophys. Bull.—2011.—**35**—P. 181—186.
24. Isobe H., Tripathi D., Archontis V. Ellerman bombs and jets associated with resistive flux emergence // Astrophys. J. Lett.—2007.—**657**.—P. L53—L56.
25. Jess D. B., Mathioudakis M., Browning P. K., et al. Microflare activity driven by forced magnetic reconnection // Astrophys. J. Lett.—2010.—**712**.—P. L111—L115.
26. Kitai R. On the mass motions and the atmospheric states of moustaches // Solar Phys.—1983.—**87**.—P. 135—154.
27. Kitai R., Muller R. On the relation between chromospheric and photospheric fine structure in an active region // Solar Phys.—1984.—**90**.—P. 303—314.

28. *Kondrashova N. N., Pasechnik M. N., Chornogor S. N., et al.* Atmosphere dynamics of the active region NOAA 11024 // *Solar Phys.*—2013.—**284**, N 2.—P. 499—513.
29. *Koval A. N., Severny A. B.* On the asymmetry of moustaches // *Solar Phys.*—1970.—**11**.—P. 276—284.
30. *Kurokawa H., Kawaguchi I., Funakoshi Y., et al.* Morphological and evolutionary features of Ellerman bombs // *Solar Phys.*—1982.—**79**.—P. 77—84.
31. *Matsumoto T., Kitai R., Shibata K., et al.* Height dependence of gas flows in an Ellerman bomb // *Publs Astron. Soc. Jap.*—2008.—**60**.—P. 95—102.
32. *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 // *Publs Astron. Soc. Jap.*—2008.—**60**.—P. 577—585.
33. *Nelson C. J., Doyle J. G., Erdelyi R., et al.* Statistical analysis of small Ellerman bomb events // *Solar Phys.*—2013.—**283**, N 2.—P. 307—323.
34. *Nindos A., Zirin H.* Properties and motions of Ellerman bombs // *Solar Phys.*—1998.—**182**, N 2.—P. 381—392.
35. *Pariat E., Aulanier G., Schmieder B., et al.* Resistive emergence of undulatory flux tubes // *Astrophys. J.*—2004.—**614**.—P. 1099—1112.
36. *Pariat E., Schmieder B., Berlicki A., et al.* Spectrophotometric analysis of Ellerman bombs in the Ca II, H, and UV range // *Astron. and Astrophys.*—2007.—**473**.—P. 279—289.
37. *Qiu J., Ding M. D., Wang H., et al.* Ultraviolet and H emission in Ellerman Bombs // *Astrophys. J.*—2000.—**544**.—P. L157—L161.
38. *Severny A. B.* Mass motions in flares and moustaches indicated by special spectral features // *Mass Motions in Solar Flares and Related Phenomena: Proceedings of the 9th Nobel Symposium, held in Anacapri, Italy, June 10—12, 1968 / Ed. by Yngve Oehman.* — Stockholm: Almqvist & Wiksell, and New York: Wiley, 1968.—P. 71.
39. *Socas-Navarro H., Martinez Pillet V., Elmore D., et al.* Spectropolarimetric observations and non-LTE modeling of Ellerman bombs // *Solar Phys.*—2006.—**235**, N 1-2.—P. 75—86.
40. *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.—**278**, N 1.—P. 73—97.
41. *Vissers G. J. M., Rouppe van der Voort L. H. M., Rutten R. J.* Ellerman bombs at high resolution. II. Triggering, visibility and effect on upper atmosphere // *Astrophys. J.*—2013.—**774**, N 1.—id. 32.—14 p.
42. *Watanabe H., Kitai R., Okamoto K., et al.* Spectropolarimetric observation of an emerging flux region: triggering mechanisms of Ellerman bombs // *Astrophys. J.*—2008.—**684**.—P. 736—746.
43. *Watanabe H., Vissers G., Kitai R., et al.* Ellerman bombs at high resolution: 1. Morphological evidence for photospheric reconnection // *Astrophys. J.*—2011.—**736**.—P. 71—83.
44. *Zachariadis Th. G., Alissandrakis C. E., Banos G.* Observations of Ellerman bombs in H // *Solar Phys.*—1987.—**108**, N 2.—P. 227—236.

Статья поступила в редакцию 15.05.15