

УДК 523.985.3

М. Н. Пасечник

Главная астрономическая обсерватория Национальной академии наук Украины
ул. Академика Заболотного 27, Киев, 03143
rita@mao.kiev.ua

**Спектральное исследование бомб Эллермана.
Фотосфера**

Представлены результаты анализа спектральных наблюдений 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 (~ 3 с) были получены на франко-итальянском солнечном телескопе THEMIS 4 июля 2009 г. Время наблюдений 20 мин. Использован участок спектра ~ 630 нм, включающий фотосферные линии, которые формируются в большом диапазоне высот: линии нейтрального железа Fe I 630.15 , 630.25 , 630.35 нм и линию титана Ti I 630.38 нм. Во время наших наблюдений яркость БЭ-1 уменьшалась, а БЭ-2 — увеличивалась. Профили линий металлов, полученные для разных периодов развития БЭ, были асимметричными. Асимметрия более ярко выражена в линиях, формирующихся в нижних слоях фотосферы, профили которых в большинстве случаев состояли из нескольких компонентов. При уменьшении центральной глубины профилей их полуширина увеличивалась. Проанализированы изменения центральной интенсивностей фраунгоферовых линий в спектрах областей бомб Эллермана и окрестностей на разных стадиях их развития. Бомбы Эллермана развились в межгранульных промежутках. Увеличение интенсивности в ядрах всех использованных в работе фотосферных линий пространственно коррелирует с увеличением интенсивности в крыльях линии H α . На всех уровнях фотосферы изменения яркости носили колебательный характер, интервал между колебаниями составлял от 1 до 5 мин. Полученные нами временные изменения интенсивности фраунгоферовых линий в спектрах исследуемого участка АО, указывают на то, что в результате выхода нового магнитного потока произошли последовательные магнитные пересоединения в области БЭ-1, возбуждение распространилось вдоль участка и вызвало появление БЭ-2, затем они развивались как физически связанная пара.

Ключевые слова: Солнце, фотосфера, активность, спектральное исследование, бомбы Эллермана.

ВВЕДЕНИЕ

Бомбы Эллермана (БЭ) являются одним из наиболее интересных проявлений солнечной активности. Их спектры в линии H α впервые были получены во время визуальных и фотографических наблюдений Солнца Вальтером Митчелом в 1909 г. на телескопе Хаверфордского колледжа и Фердинандом Эллерманом в 1915 г. на обсерватории Маунт Вилсон [10]. Позднее за внешний вид в спектрах это явление получило еще одно название — усы (moustaches) [6]. Наиболее очевидной характеристикой спектров БЭ являются яркие узкие эмиссионные полосы (длиной до 0.5 нм) в обеих крыльях хромосферных линий и сильное поглощение в их центре.

Основные морфологические свойства БЭ описаны в работах [13, 14, 23, 26, 27, 40]. Это короткоживущие, мелкомасштабные яркие структуры в атмосфере Солнца (точки). Наблюдения показали, что они возникают преимущественно в молодых развивающихся активных областях (АО) со сложной магнитной структурой, в областях выходящих магнитных потоков и в окрестностях солнечных пятен. Было установлено, что типичный размер БЭ — около 1'', среднее время жизни около 15 мин. Часто БЭ сопровождают небольшие хромосферные выбросы — сержи (surges), которые, как считается, свидетельствуют о магнитном пересоединении в нижней хромосфере [13, 24, 41]. В основном БЭ наблюдаются в линии H α , но также видны как яркие точки в УФ-континууме вблизи $\lambda = 160$ и 170 нм, в линиях Ca II H и K, Ca II 854.2 нм, однако в этих линиях обнаруживают гораздо меньше БЭ, чем в линии H α [8, 16, 17, 25, 29, 31, 34]. Найдено также диффузное уярчение в линиях Na I D и Mg I b [33]. Наблюдения показали [41], что половина всего количества бомб Эллермана появляются и исчезают попарно.

Бомбы Эллермана широко изучаются в последние годы в связи с их динамичным, взрывным характером, а также в связи с тем, что они могут иметь влияние на сложную динамику верхней атмосферы Солнца и внести существенный вклад в нагревание нижних слоев хромосферы [14, 26—28]. Было высказано предположение, что БЭ образуются путем магнитного пересоединения в нижней хромосфере или в фотосфере [8, 10, 13, 14, 30, 38, 39], в то же время нет убедительных доказательств их влияния на внешнюю атмосферу — на изображениях в линиях He II 30.4 нм, Fe IX 17.1 нм и Fe XIV 21.1 нм они не видны [38]. Было найдено, что БЭ связаны с сильными магнитными полями внутри межгранульных полос и явное большинство их происходит в местах, где положительные и отрицательные полярности приводятся в движение фотосферными горизонтальными потоками [18, 28].

Большинство работ по изучению свойств БЭ выполнены на основе наблюдений хромосферных линий. В работах по исследованию и моделированию фотосферы бомб Эллермана обычно рассматривается только линия Fe I 630.25 нм, образующаяся в верхнем слое фотосферы [8, 9, 28, 32, 38].

В работе [28] обнаружили усиление интенсивности этой линии совместно с пространственной концентрацией магнитного поля в фотосфере. Было установлено, что уярчение в крыльях линии H α , интерпретируемое как БЭ, часто пространственно коррелирует с увеличением интенсивности в ядре линии Fe I 630.25 нм [28]. Согласно авторам это связано с тем, что основной вклад в формирование крыльев оптически толстой хромосферной линии H α вносят нижняя хромосфера и верхняя фотосфера [36]. В работе [28] сделан вывод, что совместное пространственное увеличение интенсивности в ядре линии Fe I 630.25 нм и в крыльях линии H α , которое происходит на небольших биполярных областях как в наблюдениях, так и при моделировании, является доказательством того, что БЭ образуются в результате магнитного пересоединения в фотосфере.

В работе [24] изучалось фотосферное поле скоростей БЭ с использованием линии поглощения Ti II 655.957 нм, которая формируется в нижнем слое фотосферы. Временные кривые лучевой скорости в верхних и нижних слоях фотосферы на участке АО с развивающейся БЭ приведены в работе [4]. Было также высказано предположение, которое подтверждают исследования [16, 21, 29], что бомбы Эллермана образуются в результате последовательных прерывистых магнитных пересоединений в нижней хромосфере или верхней фотосфере.

Цель нашей работы — изучить особенности изменений фраунгоферовых линий, образующихся в спектрах бомб Эллермана в разных слоях фотосферы, по сравнению с фраунгоферовыми линиями в спектре спокойной фотосферы, а также участка АО без активных образований. Ниже представлены результаты спектрофотометрического анализа двух бомб Эллермана (БЭ-1 и БЭ-2), которые наблюдались 4 июля 2009 г. в развивающейся активной области NOAA 11024. Определены и проанализированы изменения интенсивностей фотосферных линий в спектрах бомб Эллермана и их окрестностей, полученных на разных стадиях развития БЭ.

Данная работа является продолжением нашей работы [5], в которой представлены результаты анализа спектральных наблюдений этих двух БЭ в линии H α .

НАБЛЮДАТЕЛЬНЫЙ МАТЕРИАЛ

Исследованные в данной работе две бомбы Эллермана (БЭ-1 и БЭ-2) возникли и развивались в активной области NOAA 11024 [5, 22]. В день наблюдений, 4 июля 2009 г., активная область (АО) находилась

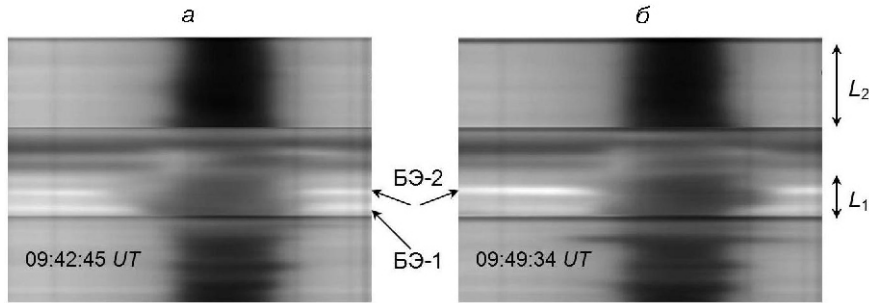


Рис. 1. H -спектры АО, полученные в разные моменты наблюдения. БЭ-1 и БЭ-2 — бомбы Эллермана, L_1 — исследуемый участок, L_2 — участок спектра области АО без активных образований и вне области выходящего магнитного потока

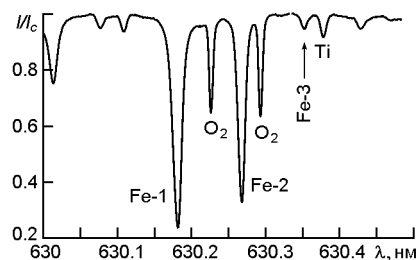
на солнечном диске возле центрального меридиана (S25E02 (–29, –449)). Активность ее быстро росла — в разных местах АО выходили новые магнитные потоки, образовывались поры и пятна, увеличилось число возникающих микровспышек [12, 37]. Наблюдения одновременно в нескольких участках спектра были проведены Е. В. Хоменко на франко-итальянском 90-см вакуумном телескопе THEMIS Института астрофизики на Канарских островах (Испания, остров Тенерифе). Время наблюдений составило 20 мин — от 9^h30^m до 9^h50^m UT. Интересно, что начало наблюдений совпало с начальной стадией развития БЭ-2.

На рис. 1 представлены H -спектры, полученные в 9^h42^m45^s UT (хорошо видны две БЭ) и в 9^h49^m34^s UT (в последний момент наблюдений БЭ-2 яркая, а БЭ-1 почти не видна, — небольшое свечение осталось только в красном крыле H).

Бомбы Эллермана образовались в области одного из трех выходящих в это время магнитных потоков [37]. Во время наших наблюдений яркость БЭ-1 уменьшалась, а БЭ-2 — увеличивалась. В нашей предыдущей работе [5] приведены результаты анализа спектральных наблюдений в линии H : магнитограмма АО, полученная SOHO/MDI 4 июля 2009 г., исследуемый участок АО, положение щели спектрографа; описаны особенности H -спектров, полученных в разные моменты наблюдения. Исследованы временные вариации интенсивности в крыльях линии H на расстоянии ± 0.1 и ± 0.15 нм от центра линии, а также особенности изменения лучевых скоростей хромосферного вещества в области бомб Эллермана и в их окрестностях. Они указывают на то, что бомбы Эллермана возникли и развивались как физически связанная пара.

Для исследования изменений параметров плазмы на разных уровнях фотосферы во время развития БЭ был использован участок спектра 630 нм (рис. 2). Он интересен тем, что включает линии, которые формируются в большом диапазоне высот: две сильные фраунгоферовы линии нейтрального железа Fe I 630.15 и 630.25 нм и две слабые линии: Fe I 630.35 нм и Ti I 630.38 нм, в тексте они условно об-

Рис. 2. Участок спектра 630 нм, включающий изучаемые линии



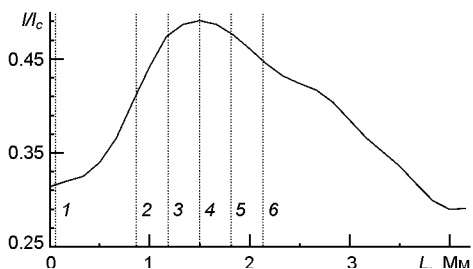
означены Fe-1, Fe-2, Fe-3 и Ti соответственно. Длина исследуемого участка спектра 0.55 нм. Центральные глубины профилей и высоты образования центров этих линий, полученных для невозмущенной фотосферы в центре диска Солнца, а также эффективные факторы Ланде равны соответственно: $d_0 = 0.719, 0.650, 0.045, 0.072, h = 489, 381, 139, 180$ км [1] и $g_{\text{эф}} = 1.7, 2.5, 1.3, 0.9$ [7]. Видно, что глубины первых двух линий гораздо больше глубин последних двух линий, поэтому можно ожидать, что в активной области, как и в спокойной фотосфере, слабые линии образуются глубже, т. е. центральные интенсивности двух первых линий формируются в верхних, а двух последних линий — в нижних слоях фотосферы.

ИЗМЕНЕНИЯ ФОТОСФЕРНЫХ ЛИНИЙ В СПЕКТРАХ БОМБ ЭЛЛЕРМАНА И ИХ ОКРЕСТНОСТЕЙ

Форма профилей. В данной работе мы изучали I -профили Стокса, полученные на разных расстояниях от центра БЭ-1 с интервалом 160 км. На рис. 3 показаны места разрезов и их номера на фоне распределения центральной интенсивности линии Fe-1 вдоль щели спектрографа для момента наблюдений $9^h 34^m 03^s$ UT. Ниже будут анализироваться изменения формы профилей фотосферных линий в спектрах областей бомб Эллера и их окрестностей, а также в спектрах, полученных на разных стадиях развития БЭ.

На рис. 4 приведены профили линий в спектрах БЭ-1 на разных расстояниях от ее центра для момента наблюдений $9^h 34^m 03^s$ UT (прошло 3 мин после начала наблюдений), ниже будет видно (рис. 10, 11), что в этот момент произошло резкое увеличение яркости БЭ-1, а БЭ-2 только начинала развиваться. Как видно из рис. 3, профили I получены для участка АО вне области БЭ-1, профили 4 получены для центра

Рис. 3. Изменение центральной интенсивности линии Fe-1 вдоль щели спектрографа для момента времени $9^h 34^m 03^s$ UT, вертикальными линиями 1—6 указаны места разрезов



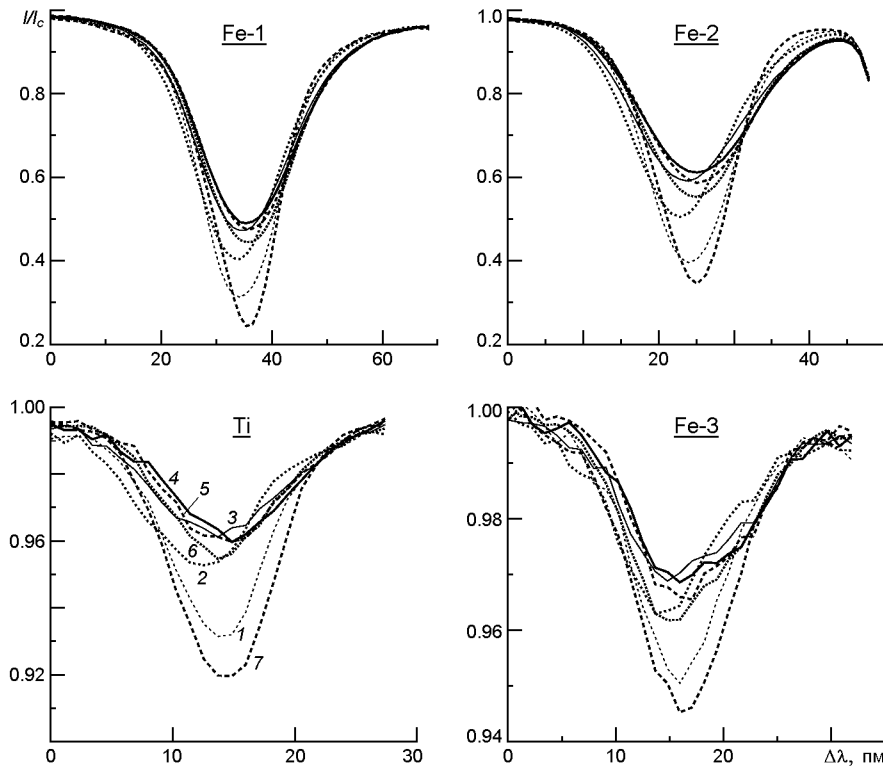


Рис. 4. Профили фраунгоферовых линий в спектре БЭ-1, полученные на разных расстояниях от ее центра (сечения 1—6 см. на рис. 3) для момента наблюдений $9^h 34^m 03^s$ UT. Профили 7 получены для участка АО без активных образований и вне области выходящего магнитного потока

БЭ, профили 3, 5 и 2, 6 — соответственно для расстояний ± 0.33 и ± 0.67 Мм от центра БЭ. Профили 7 приведены для сравнения, они получены для участка АО без активных образований и вне области выходящего магнитного потока (L_2 на рис. 1). Их центральная глубина отличается от центральной глубины профилей линий для спокойной фотосферы на 4 % для профиля линии Fe-1 и меньше, чем на 1 % для профилей остальных линий.

Видно, что профили линий, формирующихся в верхнем слое фотосферы (Fe-1 и Fe-2) гладкие, но асимметричные, их центральная интенсивность увеличивается от краев БЭ к ее центру. В спектре центральной части бомбы Эллера по сравнению с окружающей фотосферой (профили 4 и 1) остаточная интенсивность I/I_c увеличилась на 18 и 22 % для линий Fe-1 и Fe-2 соответственно. Коротковолновые крылья профилей 1, 2, как и их центральные части сдвинуты в синюю сторону относительно профиля 7. У профиля 3 центральная часть сдвинута в синюю сторону, а красное крыло сдвинуто в красную сторону (красная асимметрия). Профиль 4 для центра БЭ, а также профили 5 и 6 сдвинуты в красную сторону относительно профиля 7, в крыльях — красная асимметрия. То есть, профили, полученные для участков, находящихся на одинаковом расстоянии от центра БЭ (± 0.33

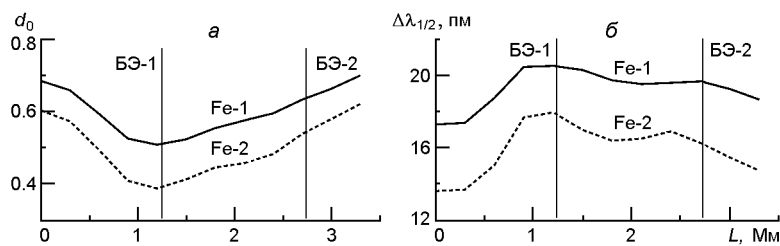


Рис. 5. Изменение: а — центральной глубины d_0 , б — полуширины $\Delta\lambda_{1/2}$ профилей линий Fe-1 и Fe-2 вдоль исследуемого участка АО. Вертикальные линии указывают центры БЭ

и ± 0.67 Мм), сдвинуты в разные стороны относительно профиля 7, но все профили имеют красную асимметрию в крыльях. Это, вероятно, связано с движением фотосферного вещества вверх и вниз.

Интересно отметить ход изменений интенсивности в красном крыле линии Fe-2: при увеличении I/I_c в центре линии в ее красном крыле величина I/I_c уменьшалась, тогда как в синем крыле линии изменения I/I_c находились в пределах ошибок измерений.

Видно, что у профилей фраунгоферовых линий, формирующихся в нижних слоях фотосферы (Ti и Fe-3), асимметрия выражена сильнее. Профили 1 и 7, как и для верхней фотосферы — гладкие. Интенсивность профилей 1 больше интенсивностей профилей 7 примерно на 1 %. Центральная интенсивность профилей линий Ti и Fe-3 для центра БЭ была увеличена на 3 и 2 % соответственно по сравнению с профилями для окружающей фотосферы. Асимметрия сильнее выражена у профилей Fe-3 — большинство из них состояли из нескольких компонентов, которые появлялись в основном в длинноволновом крыле. Коротковолновое крыло профилей более гладкое, но периодически в нем появлялись компоненты. У профилей для центральной части БЭ обычно компоненты наблюдались в обоих крыльях. Вероятно, это означает, что нижние слои фотосферы БЭ имели более тонкую структуру, т. е. состояли из нескольких струй плазмы, имеющих разную температуру и движущихся с разными скоростями.

Изменялась и полуширина профилей. Было определено, что с уменьшением центральной глубины линий d_0 полуширина их профилей $\Delta\lambda_{1/2}$ увеличивалась. На рис. 5 показано изменение этих величин вдоль исследуемого участка АО для линий Fe-1 и Fe-2, вертикальные линии указывают центры БЭ. Видно, что изменение величин d_0 и $\Delta\lambda_{1/2}$ происходило в противофазе.

Изменение формы профилей со временем показано на рис. 6 на примере профилей фраунгоферовых линий для центральной части БЭ-2 в спектрах, полученных на разных стадиях ее развития. Напомним, что начало наблюдений совпало с началом развития БЭ-2, т. е. первые спектры относятся к самой ранней стадии ее развития. В нашей предыдущей работе [5] получено, что в начале наблюдений на спектрах, относящихся к области образования БЭ-2, начала увеличиваться интенсивность в крыльях линии H, а после момента $9^h 35^m 32^s$

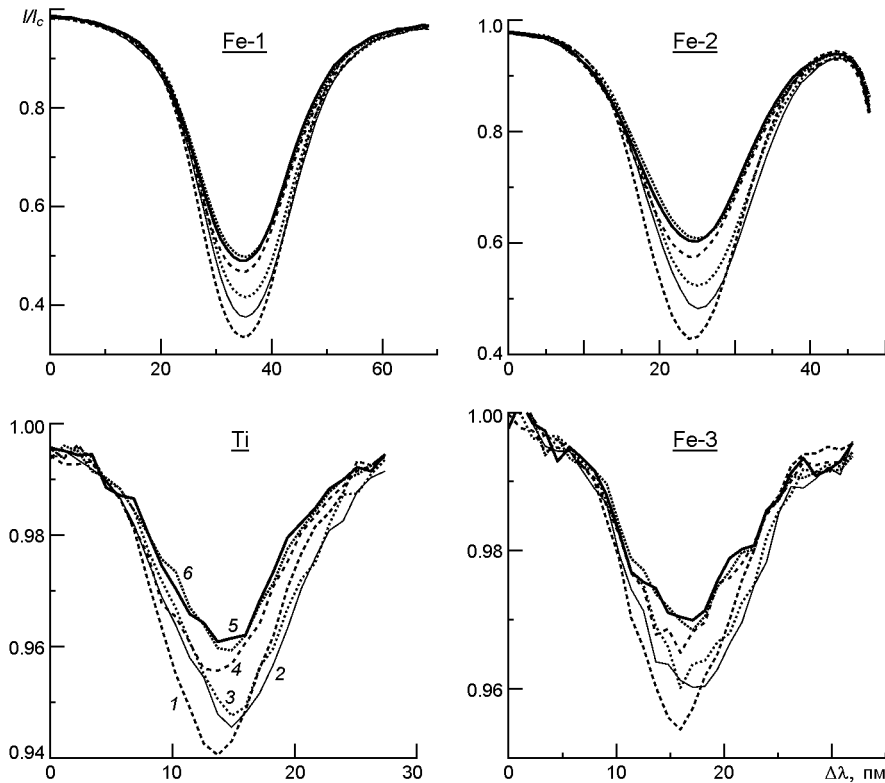


Рис. 6. Профили фраунгоферовых линий для центральной части БЭ-2 в спектрах, полученных на разных стадиях ее развития. Кривые 1—6 — соответственно для моментов времени $9^h31^m07^s$, $9^h35^m32^s$, $9^h38^m07^s$, $9^h44^m42^s$, $9^h47^m40^s$ и $9^h48^m20^s$ UT

UT (через 5 мин после начала наблюдений) на кривой изменения интенсивности вдоль щели спектрографа в крыльях линии H четко выделялся максимум, относящийся к развивающейся БЭ-2. К концу наблюдений БЭ-2 была более яркой, чем БЭ-1.

Рис. 6 показывает, как изменялись за время наблюдений профили линий, формирующихся в разных слоях фотосферы. Профили 1 для центральной части БЭ-2 получены по одному из первых спектров. Их интенсивность I/I_c больше интенсивности профилей для невозмущенной фотосферы на 5 и 8 % для линий, образующихся в верхнем слое фотосферы (Fe-1 и Fe-2), и на 1 % для линий, образующихся в нижнем слое фотосферы (Ti и Fe-3). Все профили гладкие. Профили 2—6 относятся к разным моментам наблюдения (см. подпись к рис. 6). Профили 2 получены для момента $9^h35^m32^s$ UT. Видно, что они асимметричные (красная асимметрия), в это время у линии H более интенсивным было синее крыло [5]. Их центральные части сдвинуты в красную сторону относительно профилей 1. Интенсивность профилей для линий Fe-1, Fe-2 увеличилась на 4 и 6 %, а полуширина — на 3 и 7 %, для линий Ti и Fe-3 — на 1 %, а $\lambda_{1/2}$ — на 14 и 23 % соответственно. Видно, что по сравнению с профилями 1 сильно увеличилась полу-

ширина профилей линий, формирующихся в нижнем слое фотосферы, вероятно, это свидетельствует об усилении движения вещества в этой области. В работе [6] сделан вывод, что для линий металлов в спектрах БЭ доплеровский контур линии практически полностью определяется только скоростями макроскопических движений, подобных турбулентности.

До конца наблюдений остаточная интенсивность профилей в спектрах БЭ-2 в среднем увеличивалась. Профили асимметричные, и асимметрия более ярко выражена для линии Fe-3, образующейся в нижнем слое фотосферы. Необходимо заметить, что увеличение I/I_c - и $1/2$ -профилей со временем происходило неравномерно — значения величин интенсивности и полуширин всех профилей 3 были больше значений этих величин профилей, полученных для более позднего момента (между этими моментами прошло 2 мин).

На рис. 6 также видно, что максимальные значения I/I_c для линий Fe-1 и Fe-2 получены для одного из последних моментов наблюдений в $9^h47^m40^s$ UT, а для линий Ti и Fe-3 значения I/I_c достигли максимума к моменту $9^h48^m20^s$ UT, т. е. на 40^s позже. Возможно, возбуждение шло из верхних слоев фотосферы в нижние. Значения центральной интенсивности и полуширины профилей линий Fe-1, Fe-2, Ti и Fe-3, полученные для этих моментов наблюдений, были больше значений этих величин для невозмущенной фотосферы на 22, 26, 3, 2 % и на 40, 47, 15, 33 % соответственно.

Вычисления показывают, что наибольшие изменения формы профилей происходили в линии Fe I 630.25 нм.

Подобные изменения формы профилей фраунгоферовых линий в спектре бомбы Эллермана описаны в работе [2]. Было получено, что профиль линии Fe I 630.25 нм для центра исследованной в этой работе БЭ слабее на 18—23 %, а полуширина — больше на 40—70 % по сравнению с профилем для невозмущенной области фотосферы.

Изменения интенсивности. Известно, что основными факторами, влияющими на все активные процессы в фотосфере, являются наличие грануляции, обусловленной конвективными движениями, и квазипериодические пятиминутные колебания интенсивности и скорости, обусловленные волновыми движениями. В работе [3] на основе статистического анализа наблюдений были подробно исследованы изменения интенсивности и скорости, обусловленные конвекцией, в диапазоне от уровня образования континуума до температурного минимума, а также связь между их пятиминутными колебаниями и грануляцией в спокойной фотосфере Солнца для линии Fe I 532.4185 нм.

Участок активной области, который мы рассматривали, находился в области выходящего магнитного потока и развивающихся бомб Эллермана (на рис. 1 участок L_1). Чтобы выявить изменения в физическом состоянии фотосферного вещества, которые произошли под влиянием бомб Эллермана, мы рассмотрели также участок АО без активных образований и вне области выходящих магнитных потоков (на рис. 1 участок L_2). Спектры этих участков были получены одновре-

менно. На рис. 7а и 7б приведены изменения интенсивности в условных единицах вдоль щели спектрографа на уровне образования континуума в спектрах участков L_2 и L_1 соответственно в разные моменты наблюдений. Участок L_2 был выделен на участке L_2 и взят такой же длины, как участок L_1 . Кривые 1 и 6 получены для первого и одного из последних моментов наблюдений. Видно, что очень хорошо выделяются области гранул и межгранульных промежутков и что со временем (в течение 20 мин наблюдений), как и в спокойной фотосфере [3] грануляционная картина изменялась. Гранулы и межгранулы участвовали в горизонтальном движении, и на участке L_1 занимали меньшие площади, чем на участке L_2 . Максимальная амплитуда изменений интенсивности на участке L_1 составляла примерно 10 %, а на участке L_2 — 13 %. Центральные части БЭ находились в межгранульных промежутках. За время наблюдений интенсивность увеличилась на всем участке L_1 , но значение интенсивности в грануле и межгрануле в области развития БЭ-1 было больше, чем в области развития БЭ-2. Разность между интенсивностью межгранулы в области БЭ-1 и в области БЭ-2 доходила до 10 % (кривая 2). Нужно заметить, что в начале наблюдений интенсивность межгранулы, в которой образовалась БЭ-2, сильно уменьшилась — до 8 % (кривые 1 и 2), а затем интенсивность постепенно увеличивалась, и к концу наблюдений в этом месте начала образовываться гранула.

Полученные нами результаты согласуются с выводом [15] о том, что эволюция выходящего магнитного потока на фотосферном уровне характеризуется искажением грануляционной картины.

На рис. 6в приведены изменения остаточных интенсивностей в центрах исследованных в работе фотосферных линий в спектрах участка L_2 . Были исследованы изменения интенсивности в области гранулы и межгранульного пространства (рассматривались соседние гранула и межгранула) для линий, формирующихся в нижнем слое фотосферы, а для линий, формирующихся в верхнем слое фотосферы, это области над гранулой и межгранульным промежутком. Видно, что на уровне образования континуума интенсивность гранулы превышает интенсивность межгранулы на 15 %. На высотах образования исследуемых в работе фотосферных линий соотношение яркости гранулы и межгранулы изменялось несколько раз за время наблюдений. В некоторые интервалы времени гранула была ярче межгранулы по всей высоте фотосферы, например с $9^h36^m26^s$ по $9^h37^m54^s$ UT.

Хорошо видны квазипериодические колебания интенсивности: в области образования линии Fe-1 интервал между колебаниями составлял 5 мин, а центральная глубина была меньше в среднем на 3 % по сравнению со спокойной фотосферой, в области образования остальных линий Fe-2, Fe-3 и Ti колебания интенсивности происходят с интервалом около 3...5 мин, а центральная глубина была уменьшена в среднем на 1 % по сравнению со спокойной фотосферой. Амплитуда колебаний I/I_c в центре линии Fe-1 над межгранульным промежутком составляет в среднем 8 %, а над гранулой — 5 %, что согласуется с

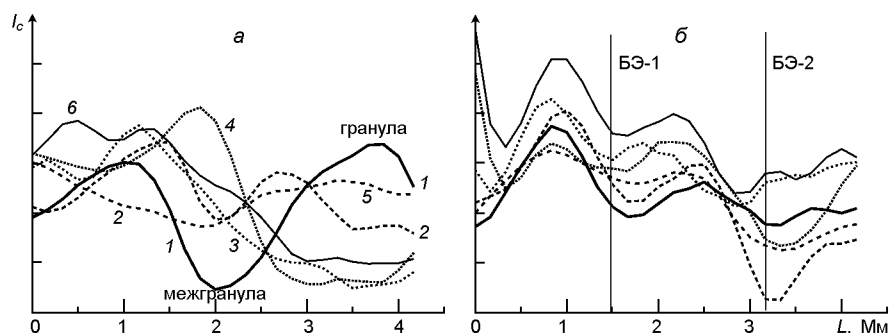


Рис. 7. Изменения интенсивности вдоль щели спектрографа на уровне образования континуума: *a* — в спектрах участка АО без активных образований и вне области выходящего магнитного потока в разные моменты наблюдений (кривые 1–6 — соответственно для моментов времени $9^h30^m56^s$, $9^h35^m57^s$, $9^h39^m06^s$, $9^h44^m42^s$, $9^h47^m21^s$ и $9^h48^m20^s$ UT); *б* — в спектрах участка АО с развивающимися БЭ в те же моменты наблюдений. Вертикальными линиями обозначены центры БЭ

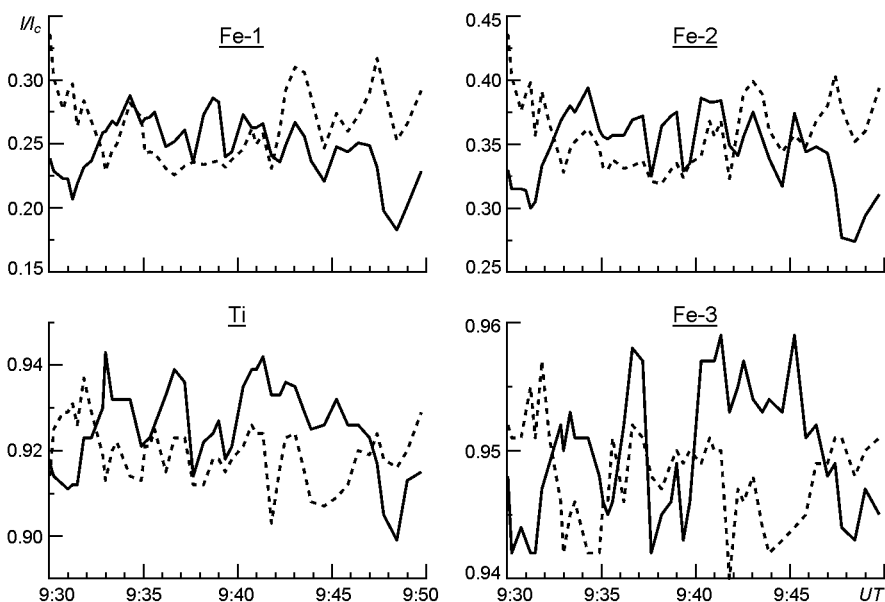


Рис. 8. Временные изменения центральных интенсивностей фраунгоферовых линий в спектрах участка L_2 , сплошная линия — в области гранулы и над ней, штриховая — в области межгранульного промежутка и над ним

выводами [3]. В работе [3] изучались колебания интенсивности в центре линии Fe I 532.4185, область образования которой, как и линии Fe I 630.25 нм (Fe-1), находится в верхней фотосфере. Был сделан вывод, что более сильные колебания интенсивности происходят над межгранулами. На рис. 7, 8 видно, что в области образования линии Fe-2 амплитуды колебаний I/I_c над гранулой и межгранульным промежутком примерно одинаковы и составляют 6...8 %. В нижнем слое фотосферы, где формируются линии Ti I и Fe-3, амплитуда колебаний I/I_c в области гранулы больше, чем в области межгранулы и составляет 1 и 2 % соответственно.

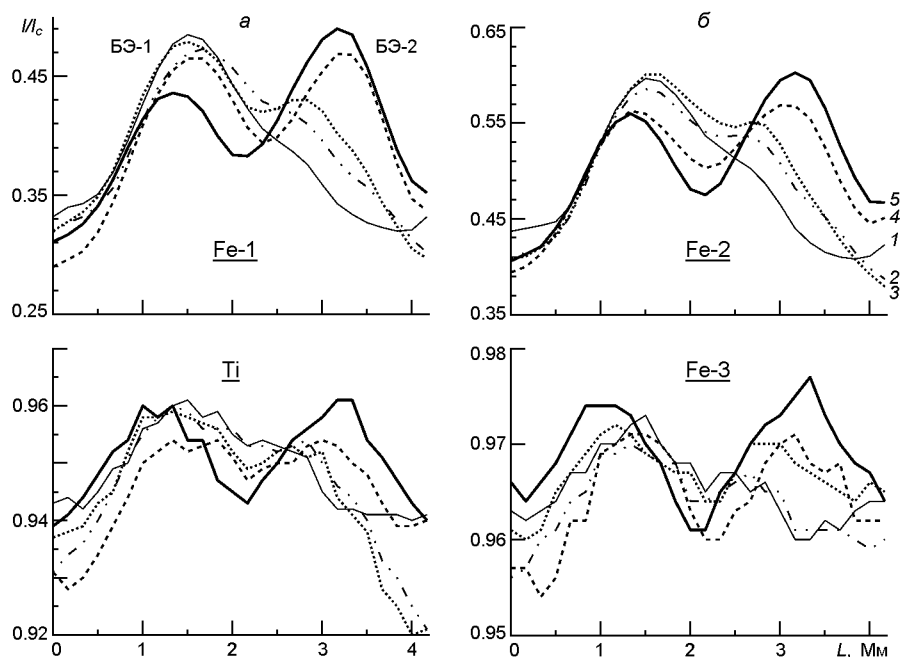


Рис. 9. Изменения интенсивности вдоль щели спектрографа в центрах фотосферных линий в разные моменты наблюдений: кривые 1 для момента времени — $9^h30^m56^s$, кривые 5 — $9^h48^m20^s$. Кривые 2, 3, 4 — соответственно $9^h35^m57^s$, $9^h37^m11^s$, $9^h44^m42^s$ (для Fe-1), $9^h35^m42^s$, $9^h36^m11^s$, $9^h45^m18^s$ (для Fe-2), $9^h35^m57^s$, $9^h37^m11^s$, $9^h42^m45^s$ (для Ti), $9^h34^m17^s$, $9^h39^m43^s$, $9^h42^m28^s$ UT (для Fe-3)

Были определены центральные интенсивности фраунгоферовых линий в спектрах областей бомб Эллермана и в их окрестностях на разных стадиях развития БЭ.

На рис. 9 показаны изменения интенсивности вдоль щели спектрографа в центрах исследованных в работе фотосферных линий в разные моменты наблюдений. На всех четырех панелях кривые 1 и 5 соответствуют началу и концу наблюдений. Видно, что на кривых интенсивности для первого момента наблюдений на всех уровнях фотосферы хорошо выделялся максимум, соответствующий БЭ-1, и начала увеличиваться интенсивность в правом крыле кривых 1. В следующие моменты наблюдений увеличение интенсивности распространилось вдоль участка АО, на кривых 2 и 3 уже четко выделялся максимум соответствующий развивающейся БЭ-2. Видно, что в это время более яркой была БЭ-1. В последующем яркость БЭ-1 уменьшалась, а БЭ-2 постепенно увеличивалась, кривые 4 соответствуют моментам, когда их яркость стала приблизительно одинаковой, а в конце наблюдений БЭ-2 стала более яркой по сравнению с БЭ-1 (кривые 5).

На кривых интенсивности, полученных для линии Fe-1, четко выделялся максимум, соответствующий развивающейся БЭ-2 через 7 мин после начала наблюдений (кривая 3). Яркость БЭ-1 была выше яркости БЭ-2 на 5%. В это время расстояние между центрами БЭ в этой области фотосферы составляло $L = 1.25$ Мм. Оно постепенно уве-

личивалось, и примерно через 12 мин после начала наблюдений, к моменту $9^h42^m03^s$ УТ, стало равным 1.67 Мм и оставалось таким до конца наблюдений. Кривая 5 показывает, что в конце наблюдений яркость БЭ-2 была больше яркости БЭ-1 на 6 %. Кривые изменения I/I_c для линии Fe-2 вели себя подобным образом, но к концу наблюдений в этой области фотосферы расстояние между БЭ увеличилось до 1.83 Мм, а яркость БЭ-2 стала на 5 % выше яркости БЭ-1.

Видно, что в нижнем слое фотосферы (линии Ti и Fe-3) изменение яркости имело более тонкую структуру, чем в верхнем слое. Вероятно, на этом уровне фотосферы поток вещества состоял из нескольких струй, имеющих разную температуру и движущихся с разными скоростями. Интенсивность в центрах линий Ti и Fe-3 на спектрах БЭ-1 за время наблюдений уменьшилась всего на 0.5 %, а на спектрах БЭ-2 увеличилась на 2-3 %. В конце наблюдений яркости бомб Эллермана отличались не больше чем на 1 %. Расстояние между БЭ увеличилось до 2.1 и 2.3 Мм на уровне формирования Ti и Fe-3 соответственно.

В основном закономерности в изменении интенсивности вдоль щели спектрографа на разных уровнях фотосферы для бомб Эллермана во время наших наблюдений были очень похожими. Однако четкое выделение на кривых интенсивности максимума, соответствующего БЭ-2, и достижение бомбами Эллермана одинаковой яркости происходило в разное время. Расстояние между БЭ уменьшалось с увеличением высоты фотосферы. Изменялась и площадь, занимаемая бомбами Эллермана, — наибольшую площадь они занимали в нижнем слое фотосферы к концу наблюдений.

На рис. 10 и 11 показаны временные изменения интенсивностей в центрах исследованных в работе фотосферных линий в спектрах БЭ-1 и БЭ-2 и их окрестностей. Толстые сплошные кривые 4 и 3 соответствуют центральным частям БЭ-1 и БЭ-2 соответственно. Кривые 1 (БЭ-1) и 6 (БЭ-2) построены по спектрам участков АО вне БЭ (их окрестности). Кривые 3, 5 и 2, 6 для БЭ-1 и кривые 2, 4 и 1, 5 для БЭ-2 построены для участков, находящихся на расстоянии ± 0.33 Мм и ± 0.66 Мм от центральных частей бомб Эллермана. Рис. 10 показывает изменения I/I_c в верхнем слое фотосферы, а рис. 11 — в нижнем слое фотосферы.

Видно, что за время наблюдений яркость БЭ-1 уменьшалась, а БЭ-2 — увеличивалась, при этом на всех уровнях фотосферы изменения яркости носили колебательный характер, интервал между колебаниями составлял от 1 до 5 мин. В работе [19] отмечено, что кривые развития «усов» представляют собой ряд последовательных пиков. Значения интенсивности в центрах линий увеличивались от краев БЭ к их центральной части. Максимальных значений амплитуда колебаний яркости достигала в центральной части бомб Эллермана, причем у БЭ-2 они увеличивались со временем, к краям бомб Эллермана значения амплитуды уменьшались. Колебания временных кривых интенсивности происходили синхронно в области развития БЭ, но эта син-

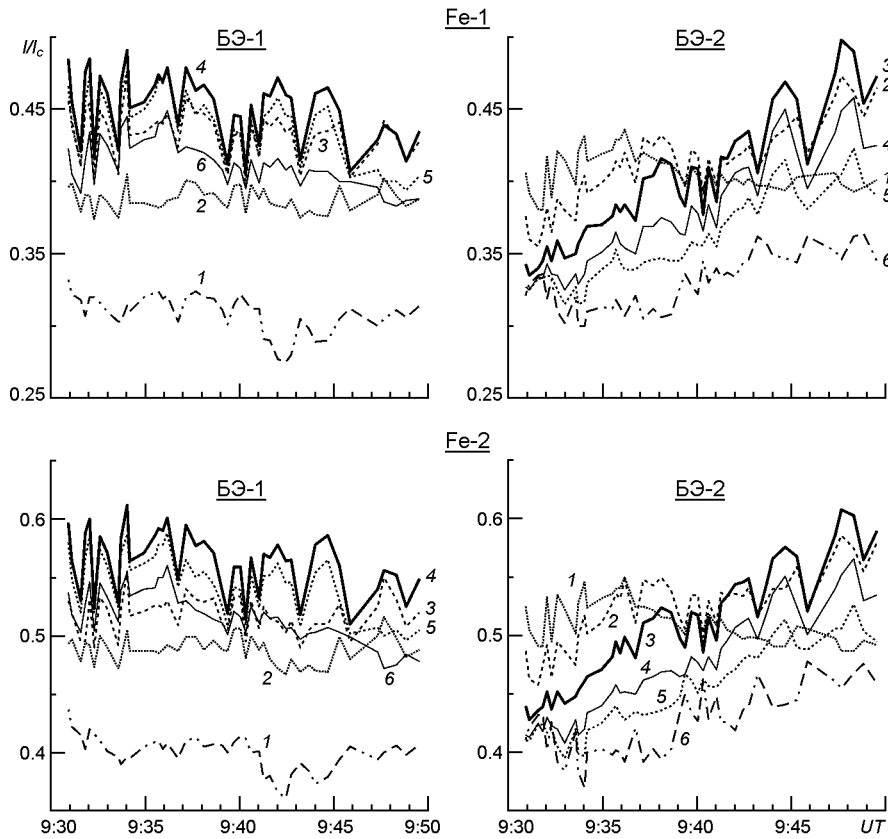


Рис. 10. Временные изменения интенсивностей фотосферных линий Fe-1 и Fe-2 на разных расстояниях от центральных частей БЭ-1 и БЭ-2 в верхнем слое фотосферы

хронность начинала нарушаться на их границах, и на участках АО вне БЭ (в их окрестностях) колебания интенсивности происходили в противофазе.

Видно, что в начале наблюдений в течение около 3 мин на всех временных кривых яркости БЭ-1 для разных слоев фотосферы выделяются три пика (максимумы достигались примерно через 1 мин, в 9^h32^m , 9^h33^m и в 9^h34^m) резкого увеличения интенсивности, которые хорошо согласуются с пиками увеличения интенсивности в крыльях линии Н (см. рис. 6, а работы [5]) и являются признаком импульсного выделения энергии в результате последовательных магнитных пересоединений. В работе [5] было получено, что при увеличении интенсивности в крыльях линии Н интенсивность в ее центре или не изменялась (БЭ-1), или немного уменьшалась (БЭ-2). Это является свидетельством того, что магнитные пересоединения происходили гораздо ниже слоя хромосферы, в котором образуется ядро линии Н.

Возбуждение, вызванное импульсным выделением энергии в области БЭ-1, начало распространяться вдоль участка АО (магнитной петли) и вызвало развитие БЭ-2. На рис. 10, 11 видно постепенное увеличение остаточной интенсивности линий в спектрах БЭ-2. Известно,

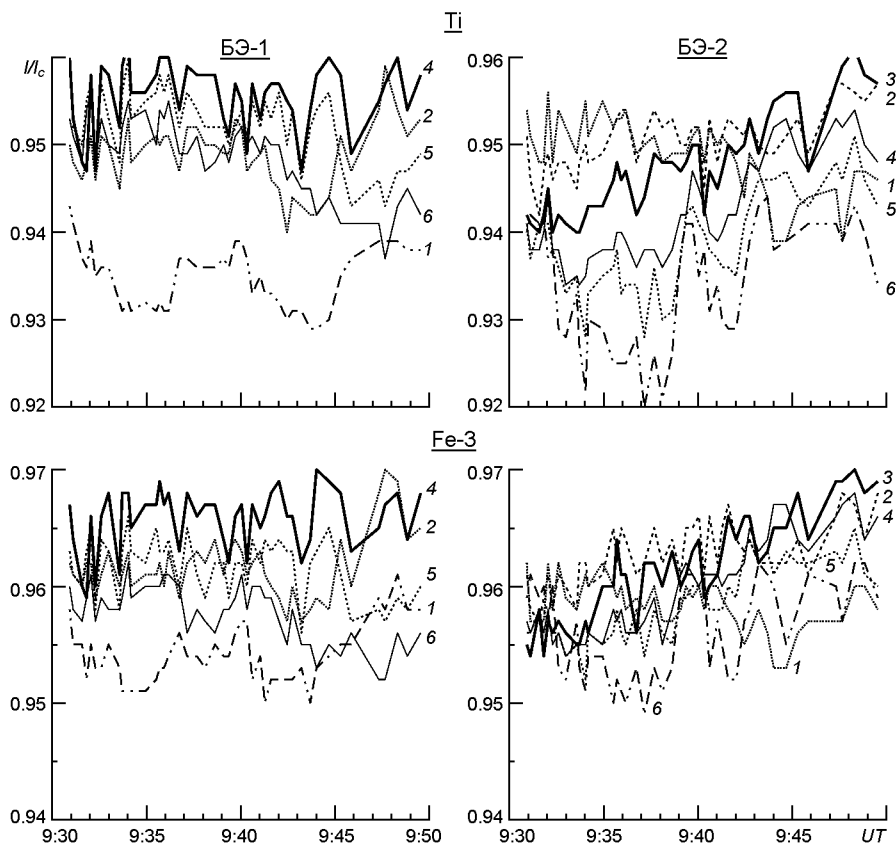


Рис. 11. То же для нижнего слоя фотосферы (линии Ti и Fe-3)

что обычно пары бомб Эллера развиваются в основаниях компактных магнитных петель. На кривых изменения интенсивности видно, что наибольшие значения I/I_c в пиках интенсивности были в центральной части БЭ-1; на кривых 5, 6 для БЭ-1 и кривых 1, 2 для БЭ-2 эти пики видны, но с уменьшающейся амплитудой. Постепенное продвижение вдоль АО участка повышения интенсивности, соответствующее развивающейся БЭ-2, хорошо видно и на рис. 9 и 12а. То, что возникновение бомб Эллера обусловлено последовательными и прерывистыми магнитными пересоединениями в нижней хромосфере или в верхней фотосфере, подтверждают исследования [20, 21, 28, 39, 40]. В работе [30] было высказано предположение, что различные индивидуальные импульсы, наблюдающиеся в УФ-диапазоне во время развития БЭ, могут быть связаны с пульсирующим способом пересоединения. В работе [16] обнаружено, что магнитные пересоединения в БЭ происходят один за другим последовательно и периодически.

Необходимо заметить, что кривые изменения интенсивности для верхней фотосферы в спектре центральной части БЭ-2 хорошо согласуются с кривой изменения интенсивности в красном крыле H α , а те же кривые для БЭ-1 согласуются с кривой изменения интенсивности в

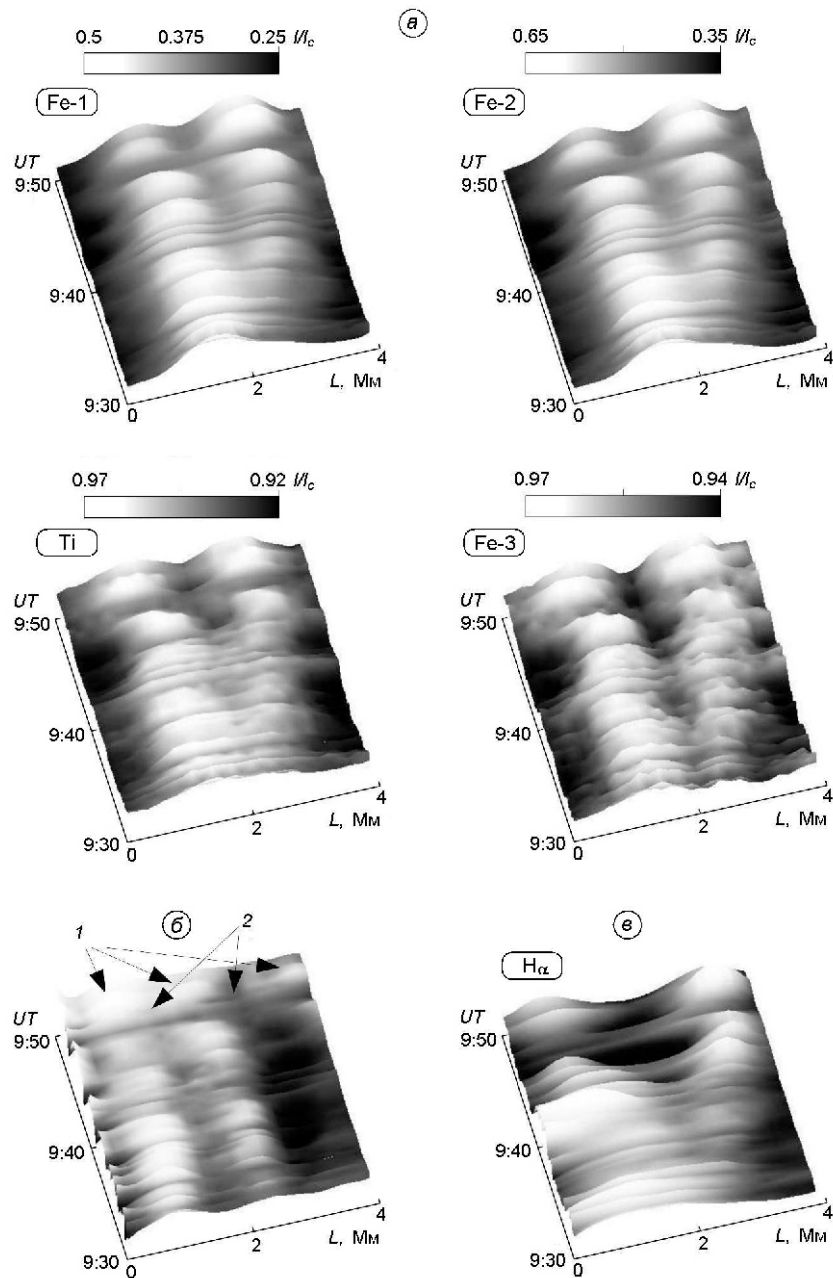


Рис. 12. Изменения интенсивности со временем вдоль щели спектрографа: *a* — на разных уровнях фотосферы; *б* — на уровне образования непрерывного спектра (1 — гранулы, 2 — межгранульные промежутки, единицы условные); *в* — в красном крыле линии H (в условных единицах)

синем крыле H (хорошо выраженный пик, относящийся к моменту наблюдений в $9^h40^m04^s$ UT в красном крыле H, на уровне фотосферы выделяется слабо).

Ход изменений яркости БЭ-1 одинаков как в верхнем, так и в нижнем слое фотосферы. На рис. 11 видно, что в нижнем слое фотосфе-

ры кривые изменения интенсивности со временем для БЭ-2 имели более тонкую структуру.

На разную величину изменилась интенсивность в центрах линий в спектрах БЭ и их окрестностей. Остаточная интенсивность линий Fe-1, Fe-2, Ti и Fe-3 в спектрах центральной части БЭ-1 и БЭ-2 увеличилась по сравнению с ее величиной в спектрах окрестностей БЭ на 15, 18, 3, 2 % и на 13, 12, 2, 1 % соответственно. Видно, что возбуждение вызвавшее развитие БЭ-2 мало затронули нижний слой фотосферы.

На рис. 12 показаны изменения интенсивности со временем вдоль щели спектрографа на разных уровнях фотосферы — от области образования континуума до верхних слоев. Для сравнения дан аналогичный рисунок для линии H β .

На рис. 12а хорошо видно, что временные изменения интенсивности носили колебательный характер и в нижнем слое фотосферы имели более тонкую структуру, чем в верхнем. Рис. 12б показывает изменение интенсивности на уровне образования непрерывного спектра. Видно, как изменилась грануляционная картина за время наблюдений. Стрелками и цифрами 1 и 2 отмечены области гранул и межгранульного пространства соответственно. Бомбы Эллермана образовались в областях межгранульных промежутков, это хорошо видно из сравнения рис. 12а и 12б. В работе [18] высказано предположение, что появление бомб Эллермана, вероятно, связано с сильными магнитными полями внутри межгранульных полос. На рис. 12а хорошо видно, как возбуждение из области БЭ-1 постепенно распространилось вдоль участка АО, и в области соседней межгранулы развилась БЭ-2. Нужно заметить, что во время этого процесса в межгрануле, в которой развивалась БЭ-2, сильно уменьшилась интенсивность, к концу наблюдений интенсивность увеличилась, и рядом с межгранулой появилась новая гранула. На рис. 12а видно также, что изменения яркости в областях развития БЭ происходили синхронно, т. е. БЭ составляли физически связанную пару.

Рис. 12в показывает временные изменения интенсивности вдоль щели спектрографа в красном крыле линии H β на расстоянии 0.1 нм от ее центра. Сравнивая рис. 12в с рис. 12а, можно видеть, что увеличение интенсивности в ядрах всех использованных в работе фотосферных линий пространственно коррелирует с увеличением интенсивности в крыльях линии H β .

ВЫВОДЫ

В работе представлены результаты анализа спектральных наблюдений двух бомб Эллермана (БЭ-1 и БЭ-2), которые возникли и развивались в активной области NOAA 11024 на участке выходящего магнитного потока. Во время наших наблюдений яркость БЭ-1 уменьшалась, а БЭ-2 — увеличивалась. Использован участок спектра 630 нм,

включающий фотосферные линии, которые формируются в большом диапазоне высот. Определены и проанализированы изменения центральных интенсивностей фраунгоферовых линий в спектрах областей бомб Эллермана и их окрестностей на разных стадиях развития БЭ и на разных уровнях фотосферы — от области образования континуума до верхних слоев.

В работе использованы *I*-профили Стокса, которые были получены по спектрам с интервалом, соответствующим расстоянию 160 км на поверхности Солнца. Наибольшие изменения формы профилей произошли в линии Fe I 630.25 нм, наиболее магниточувствительной среди исследованных в данной работе линий. В спектре центральной части БЭ-2 ее центральная глубина была меньше на 50 %, а полуширина — больше на 30 % по сравнению с профилем линии для невозмущенной фотосферы. Также было обнаружено, что профили линий металлов, полученные для разных периодов развития БЭ, были асимметричными, при этом асимметрия более ярко выражена в слабых линиях, профили которых состояли из нескольких компонентов. Вероятно, это означает, что БЭ имеют тонкую структуру, и в нижнем слое фотосферы поток вещества состоит из нескольких струй, имеющих разную температуру и движущихся с разными скоростями.

Было определено, что бомбы Эллермана развились в межгранульных промежутках. Грануляционная картина в области развития БЭ была изменена по сравнению с участком АО без активных образований и вне области выходящего магнитного потока.

Расстояние между БЭ уменьшалось с увеличением высоты фотосферы. Изменялась и площадь, занимаемая бомбами Эллермана, — наибольшую площадь они занимали в нижнем слое фотосферы к концу наблюдений.

Исследование показало, что увеличение интенсивности в ядрах всех использованных в работе фотосферных линий пространственно коррелирует с увеличением интенсивности в крыльях линии H α .

Во время развития бомб Эллермана на всех уровнях фотосферы изменения их яркости носили колебательный характер, интервал между колебаниями составлял от 1 до 5 мин.

Полученные нами временные изменения интенсивности фраунгоферовых линий в спектрах исследуемого участка АО в областях бомб Эллермана и их окрестностях указывают на то, что возбуждение, вызванное последовательными магнитными пересоединениями в области БЭ-1, распространилось вдоль магнитной петли и вызвало появление БЭ-2, затем они развивались как физически связанная пара.

Автор выражает благодарность Е. В. Хоменко, Р. И. Костыку и И. Э. Васильевой за материалы наблюдений THEMIS и программы по их обработке.

1. Гуртовенко Э. А., Костык Р. И. Фраунгоферов спектр и система солнечных сил осцилляторов. К.: Наук. думка, 1989. 200 с.

2. Кондрашова Н. Н. Спектрополяриметрическое исследование бомбы Эллера. 1. Наблюдения. *Кинематика и физика небес. тел.* 2016. 32. № 1. С. 21—32.
3. Костык Р. И., Шукина Н. Г. Пятиминутные колебания и тонкая структура фотосферы Солнца. I. *Кинематика и физика небес. тел.* 1999. 15. № 1. С. 25—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. Пасечник М. Н. Спектральное исследование пары бомб Эллера. *Кинематика и физика небес. тел.* 2016. 32. № 2. С. 3—24.
6. Северный А.Б. Исследование тонкой структуры эмиссии активных образований и нестационарных процессов на Солнце. *Изв. Крым. астрофиз. обсерватории.* 1957. 17. С. 129—161.
7. Beckers J. M. A table of Zeeman multiplets. *Phys. Sci. Res. Papers.* 1969. N 371. 193 p.
8. Berlicki A., Heinzel P., Avrett E. H. Photometric analysis of Ellerman bombs. *Mem. Soc. astron. ital.* 2010. 81. P. 646—652.
9. Bharti L., Rimmele Th., Jain R., et al. Detection of opposite polarities in a sunspot light bridge: evidence of low-altitude magnetic reconnection. *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 2007. 376. N 3. P. 1291—1295.
10. 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.
11. Ellerman F. Solar hydrogen “bombs”. *Astrophys. J.* 1917. 46. P. 298—301.
12. Engell A. J., Siarkowski M., Gryciuk M., et al. Flares and their underlying magnetic complexity. *Astrophys. J.* 2011. 726. P. 12—20.
13. Fang C., Tang Y. H., Xu Z., et al. Spectral analysis of Ellerman bombs. *Astrophys. J.* 2006. 643. P. 1325—1336.
14. 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.
15. 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. 724. P. 1083—1098.
16. Hashimoto Yu., Kitai R., Ichimoto K., et al. Internal fine structure of Ellerman bombs. *Publs Astron. Soc. Jap.* 2010. 62. P. 879—891.
17. Herlender M., Berlicki A. Multi-wavelength analysis of Ellerman bomb light curves. *Cent. Eur. Astrophys. Bull.* 2011. 35. P. 181—186.
18. 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.
19. Kashapova L. K. A spectropolarimetric study of Ellerman bombs. *Astron. Report.* 2002. 46. N 2. P. 918—924.
20. Kitai R. On the mass motions and the atmospheric states of moustaches. *Solar Phys.* 1983. 87. P. 135—154.
21. Kitai R. Ellerman bomb as a manifestation of chromospheric fine scale activity / The Fifth Hinode Science Meeting. *ASP Conf. Series.* 2012. 456. P. 81.
22. 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.
23. Kurokawa H., Kawaguchi I., Funakoshi Y., et al. Morphological and evolutionary features of Ellerman bombs. *Solar Phys.* 1982. 79. P. 77—84.
24. 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.
25. 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.

26. 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.
27. Nelson C. J., Scullion E. M., Doyle J. G., et al. Small-scale structuring of Ellerman bombs at the Solar Limb. *Astrophys. J.* 2015. 798. N 1. P. 1—9.
28. Nelson C. J., Shelyag S., MATHIoudakis M., et al. Ellerman bombs — evidence for magnetic reconnection in the lower solar atmosphere. *Astrophys. J.* 2013. 779. P. 125—135.
29. Pariat E., Schmieder B., Berlicki A., et al. Spectrophotometric analysis of Ellerman bombs in the Ca II, H α , and UV range. *Astron. and Astrophys.* 2007. 473. P. 279—289.
30. Pariat E., Schmieder B., Berlicki A., et al. Spectrophotometry of Ellerman bombs with THEMIS / The Physics of Chromospheric Plasmas. ASP Conf. Series. 2007. 368. P. 253—258.
31. Qiu J., Ding M. D., Wang H., et al. Ultraviolet and H α emission in Ellerman bombs. *Astrophys. J.* 2000. 544. P. L157—L161.
32. Read A., Mathioudakis M., Doyle J. G., et al. Magnetic flux cancellation in Ellerman bombs. *Astrophys. J.* 2016. 823. N 2. P. 110—120.
33. Rutten R. J., Rouppe van der Voort L. H. M., Vissers G. J. M. Ellerman bombs at high resolution. IV. Visibility in Na I and Mg I. *Astrophys. J.* 2015. 808. N 2. P. 133—140.
34. Rutten R. J. H α features with hot onsets I. Ellerman bombs. *Astron. and Astrophys.* 2016. 590. P. 124—137.
35. Socas-Navarro H., Martínez Pillet V., Elmore D., et al. Spectro-polarimetric observations and non-LTE modeling of Ellerman bombs. *Solar Phys.* 2006. 235. N 1-2. P. 75—86.
36. Socas-Navarro H., Uitenbroek H. On the diagnostic potential of H α for chromospheric magnetism. *Astrophys. J.* 2004. 603. P. L129—L132.
37. 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.
38. 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. P. 32—46.
39. 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.
40. 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.
41. Zachariadis Th. G., Alissandrakis C. E., Banos G. Observations of Ellerman bombs in H α . *Solar Phys.* 1987. 108. N 2. P. 227—236.

Статья поступила в редакцию 05.10.2017

М. М. Пасечник

Головна астрономічна обсерваторія Національної академії наук України
Київ, Україна

СПЕКТРАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ БОМБ ЕЛЛЕРМАНА. ФОТОСФЕРА

Представлено результати аналізу спектральних спостережень двох бомб Еллермана (БЕ-1 та БЕ-2), які виникли і розвивалися в активній області NOAA 11024 на ділянці нового, висхідного магнітного потоку. Спектральні дані з високою просторовою та часовою роздільною здатністю (≈ 3 с) було отримано на франко-італійському соняч-

ному телескопі THEMIS 4 липня 2009 г. Час спостережень 20 склав хв. Використано ділянку спектру ≈ 630 нм, яка включає фотосферні лінії, що формуються у великому діапазоні висот: лінії нейтрального заліза Fe I ≈ 630.15 нм, 630.25 нм, 630.35 нм та лінію титану Ti I ≈ 630.38 нм. Під час наших спостережень яскравість БЕ-1 зменшувалася, а БЕ-2 — збільшувалася. Профілі ліній металів, які було отримано для різних періодів розвитку БЕ, були асиметричними. Асиметрія яскравіше виражена в лініях, що формуються у нижніх шарах фотосфери, профілі яких у більшості випадків склалися з декількох компонентів. При зменшенні центральної глибини профілів їхня півширина збільшувалася. Проаналізовано зміни центральних інтенсивностей фраунгоферових ліній у спектрах бомб Еллермана та їхніх околиць на різних стадіях розвитку БЕ. Бомби Еллермана розвинулися у міжгранульних проміжках. Збільшення інтенсивності в ядрах усіх досліджених у роботі фотосферних ліній, просторово кореле з збільшенням інтенсивності в крилах лінії H α . На всіх рівнях фотосфери зміни яскравості мали коливальний характер, інтервал між коливаннями становив від 1 до 5 хв. Отримані нами часові зміни інтенсивності фраунгоферових ліній у спектрах досліджуваної ділянки АО вказують на те, що в результаті виходу нового магнітного потоку відбулися послідовні магнітні пересполучення в області БЕ-1, збудження поширилося вздовж ділянки і викликало появу БЕ-2, потім вони розвивалися як фізично пов'язана пара.

Ключові слова: Сонце, фотосфера, активність, спектральне дослідження, бомби Еллермана.

M. N. Pasechnik

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

SPECTRAL STUDY OF ELLERMAN BOMBS. THE PHOTOSPHERE

The results of the spectral observation analysis of two Ellerman bombs (EB-1 and EB-2), which were formed and have evolved in the emerging magnetic flux area of active region NOAA 11024, are presented. The spectral data with high spatial and temporal resolution (about 3 seconds) were obtained with the French-Italian solar telescope THEMIS on July 4, 2009. The observation time was 20 minutes. We used a spectral region of 630 nm, which included four Fraunhofer lines that are formed over a wide range of photospheric heights: the neutral iron lines Fe I ≈ 630.15 nm, 630.25 nm, 630.35 nm and the titanium line Ti I ≈ 630.38 nm. During our observations, the brightness of EB-1 decreased, and brightness EB-2 increased. The metal line profiles obtained for different periods of the EBs development were asymmetric. Asymmetry was more pronounced in weak lines, the profiles of which consisted of several components in most cases. It was found that when the central depth of the profiles decreases, their half-width increased. Changes of the Fraunhofer lines central intensity in the spectra of the Ellerman bombs and their vicinity at different stages of the EBs evolution were analyzed. EBs developed in the intergranular lanes. An increase the core intensity of all the photospheric lines, used in the work, spatially correlated with an increase of the intensity in the H α line wings. At all photospheric levels, the brightness changes were of an oscillatory nature, the interval between the vibrations was 1 to 5 minutes. The temporal changes of the Fraunhofer line intensities in the spectra of the AO region under investigation indicate that as a result of the emergence of the new magnetic flux, there have been consecutive magnetic reconnections in the EB-1 region, the excitation has propagated along the magnetic loop and caused the appearance of the EB-2, then they developed as a physically connected pair.

Keywords: Sun, photosphere, activity, spectral study, Ellerman bombs.