

УДК 523.985.3

**Н. Н. Кондрашова**

Главная астрономическая обсерватория Национальной академии наук Украины  
ул. Академика Заболотного 27, Киев, 03680  
kondr@mao.kiev.ua

## **Спектрополяриметрическое исследование бомбы Эллермана.**

### **II. Фотосферные модели**

*Получены полуэмпирические модели фотосферы бомбы Эллермана в активной области NOAA 11024. Для моделирования использованы профили параметров Стокса  $I$ ,  $Q$ ,  $U$ ,  $V$  фотосферных линий. Спектрополяриметрические наблюдения проведены на франко-итальянском телескопе THEMIS (о. Тенерифе, Испания). Моделирование выполнялось методом инверсии с помощью программы SIR [Ruiz Cobo, del Toro Iniesta // *Astrophys. J.* 1992. 398]. Модели имеют двухкомпонентную структуру: магнитную силовую трубку и немагнитное окружение. Получены зависимости от оптической глубины температуры, напряженности магнитного поля, угла наклона вектора магнитного поля и лучевой скорости в трубке. Согласно полученным моделям термодинамические параметры фотосферы бомбы Эллермана значительно отличаются от параметров невозмущенной фотосферы. Температура в модели трубки имеет немонотонный ход по высоте, отклонение от ее значений для невозмущенной фотосферы достигает 700...900 К. В верхних и нижних слоях фотосферы наблюдались нисходящие потоки. В верхних слоях лучевая скорость достигала 17 км/с. Напряженность магнитного поля в моделях уменьшается от 0.1...0.13 Тл в нижних слоях фотосферы до 0.04...0.07 Тл в верхних. Физическое состояние фотосферы изменялось в течение наблюдений.*

*СПЕКТРОПОЛЯРИМЕТРИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ БОМБИ ЕЛЛЕРМАНА. II. ФОТОСФЕРНІ МОДЕЛІ, Кондрашова Н. М. Отримано напівемпіричні моделі фотосфери бомби Еллермана в активній області NOAA 11024. Для моделювання використано профілі параметрів Стокса  $I$ ,  $Q$ ,  $U$ ,  $V$  фотосферних ліній зі спектрополяриметричних спостережень на франко-італійському телескопі THEMIS (о. Тене-*

риффе, Іспанія). Моделювання виконувалось методом інверсії за допомогою програми SIR [Ruiz Cobo, del Toro Iniesta // *Astrophys. J.* 1992. **398**]. Моделі мають двохкомпонентну структуру: магнітну силову трубку та немагнітне оточення. Отримано розподіли з оптичною глибиною температури, напруженості магнітного поля, променевої швидкості, кута нахилу вектора магнітного поля у трубці. Згідно з моделями термодинамічні параметри фотосфери бомби Еллермана значно відрізняються від параметрів незбуреної фотосфери. Температура у моделі трубки має немонотонний хід з висотою, відхилення від її значень для незбуреної фотосфери досягає 700...900 К. У верхніх та нижніх шарах фотосфери спостерігались низхідні потоки речовини. Променева швидкість у верхніх шарах досягала 17 км/с. Напруженість магнітного поля в моделях змінюється від 0.1...0.13 Тл у нижніх шарах фотосфери до 0.04...0.07 Тл у верхніх. Фізичний стан фотосфери змінювався протягом спостережень.

*SPECTROPOLARIMETRIC INVESTIGATION OF ELLERMAN BOMB. II. PHOTOSPHERIC MODELS, by Kondrashova N. N. — Semiempirical photospheric models of Ellerman bomb in active region NOAA 11024 are obtained. The Stokes profiles I, Q, U, V of the photospheric lines obtained from the spectropolarimetric observations of the Ellerman bomb with the French-Italian solar telescope THEMIS (Tenerife, Spain) are used for the modeling. The models are derived from the inversion with SIR code, described by Ruiz Cobo and del Toro Iniesta [Ruiz Cobo, del Toro Iniesta // *Astrophys. J.* 1992. **398**]. The models include two components: a thin magnetic flux tube and nonmagnetic surroundings. The optical depth dependences of the temperature, magnetic field strength, the inclination of the magnetic field vector, and line-of-sight velocity are obtained for the magnetic flux tube. Models show that the thermodynamical parameters of the Ellerman bomb photosphere differ strongly from the parameters of the quiet photosphere. The temperature in a magnetic flux tube had the inhomogeneities with height. The deviation from its values in the quiet photosphere reached 700...900 K. The models show downflows in the lower and upper photosphere. Line-of-sight velocity in the upper layers of the photosphere reached 17 km/s. The magnetic field strength in the models varied from 0.1...0.13 T in the lower photospheric layers to 0.04...0.07 T in the upper ones. The physical state in the photosphere changed during the observations.*

## ВВЕДЕНИЕ

Бомбы Эллермана (БЭ) [8], или усы Северного [33], остаются одним из самых загадочных проявлений солнечной активности, несмотря на их многочисленные исследования в разных диапазонах длин волн. Изучению БЭ посвящено много публикаций, их подробный обзор можно

найти в работе [30]. Возможные механизмы БЭ рассмотрены в ряде работ, например [15, 16, 22, 23, 25, 30, 33, 38, 40]. Из наблюдений выявлена линейная поляризация в линии H $\alpha$ , что может свидетельствовать об ударной поляризации и образовании БЭ вследствие воздействия на хромосферу пучков энергетических частиц из области магнитных пересоединений в верхних слоях атмосферы Солнца [1, 7, 12, 15, 29]. В работе [15] рассматриваются два варианта моделей БЭ — тепловая и нетепловая. В работе [27] высказано предположение, что для разных типов БЭ подходят разные механизмы, вызывающие прогрев фотосферы и области температурного минимума.

В большинстве работ в качестве основного физического механизма образования БЭ предполагается магнитное пересоединение в нижней атмосфере Солнца вследствие выхода нового магнитного потока и его взаимодействия с магнитным полем активной области, например [3, 20, 22, 23, 25, 30—32, 39—41]. В работе [25] установлено, что большинство БЭ локализуется в области выходящего потока в магнитных силовых трубках. При наблюдениях на солнечном лимбе обнаружена непосредственная связь БЭ с выходом мелкомасштабной петли [20]. Есть разные мнения относительно области высот, на которых происходят магнитные пересоединения, вызывающие БЭ. В работах [10, 31, 39] и др. предполагалось, что пересоединения осуществляются в нижней хромосфере, в работе [9] — в нижней хромосфере и верхней фотосфере. В работе [40] установлено, что БЭ имеют тенденцию появляться вдоль магнитной сетки на высотах 600...1200 км и связаны с концентрациями магнитного поля. В работах [18—21, 30, 38, 40] указано на возможную важную роль магнитных пересоединений в фотосфере в процессе образования БЭ. Триггерным механизмом БЭ могут быть шировые пересоединения, появляющиеся при движениях противоположных полярностей при наличии фотосферных поверхностных потоков [25, 38]. В работах [3, 22] предполагается, что магнитные пересоединения могут происходить на разных уровнях солнечной атмосферы.

Численное МГД-моделирование атмосферы БЭ выполнено в работах [3, 4, 14, 21, 23, 25]. В работах [4, 14, 22] выполнено численное 2D-моделирование выхода магнитного поля и формирования БЭ в результате магнитных пересоединений. В работах [17, 22, 25, 31, 39] сообщается о наблюдениях БЭ вдоль сепаратрис и на особых участках (bald patches), где возможны магнитные пересоединения и прогрев хромосферы. Согласно результатам работы [4] нагрев возможен на высотах 300...800 км. В работах [3, 6, 24] на основе 3D-моделирования процесса выхода магнитного поля формы «морской змеи» из подфотосферных слоев во внешнюю атмосферу БЭ рассматривались как результат пересоединений волнообразных силовых линий вследствие выхода волнообразных силовых трубок. Предполагается, что в этом процессе изначально важную роль играет нестабильность Паркера [26].

Одновременные наблюдения БЭ в хромосферных и фотосферных линиях выполнены в работах [4, 18, 25, 35, 36]. Одновременно с эмис-

сией в крыльях хромосферных линий наблюдалось изменение интенсивности фотосферных линий. В работах [21, 36] из наблюдений БЭ найдено, что увеличение интенсивности в крыльях хромосферных линий сопровождалось избытком интенсивности в ядре линии Fe I 630.25 нм. В работе [4] выявили изменение профилей параметров Стокса двух фотосферных ИК-линий Fe I в процессе развития БЭ. Параметры Стокса линий H и Fe I 630.15 и 630.25 нм получены при наблюдениях на телескопе THEMIS в MTR-режиме, что позволило изучить эволюцию и топологию магнитного поля [25]. В работе [18] выявлена корреляция изменения фотосферной скорости, выведенной по доплеровским сдвигам линии Ti II 655.96 нм, с изменением во времени эмиссии в крыльях линии H .

Полуэмпирические модели атмосферы БЭ получены в ряде работ, например, [5, 9, 13, 16, 17]. В подавляющем большинстве из них для моделирования использованы хромосферные линии H и Ca II. В работе [16] вычислялись профили линии H с учетом отклонений от локального термодинамического равновесия (ЛТР). Из этих расчетов следует, что в средних слоях хромосферы температура и плотность значительно увеличены. Избыток температуры в хромосфере может составлять 1500 К. На основе наблюдений на телескопе THEMIS в линиях H и Ca II 854.2 нм в работе [9] найдено повышение температуры в нижней хромосфере и верхней фотосфере на 600...1300 К. В нетепловой модели значения температуры меньше на 100...300 К.

В работе [5] сообщается о наблюдениях БЭ в линиях H и Ca II H. Была получена сетка из 243 полуэмпирических моделей, рассчитанных при условии отклонений от ЛТР, и сделан вывод о наличии в нижней хромосфере БЭ над областью температурного минимума компактной структуры — «горячего пятна». В работе [17] для построения полуэмпирических моделей были использованы данные спектральных наблюдений, полученные с высоким пространственным разрешением. При этом получены значения избытка температуры 2700...3000 К в области температурного минимума. Световые кривые показали, что в развитии БЭ выделяются три фазы: преднагрев, вспыхивание и фаза охлаждения.

В работе [13] на основе наблюдаемых в БЭ профилей линий H и Ca II 854.2 нм была предложена модель двух облаков. Нижнее облако связано с повышенным излучением в крыльях линий, а верхнее — с поглощением в их центре. В нижнем облаке температура увеличена на 400...1000 К по сравнению с температурой невозмущенного Солнца, что может быть результатом прямого нагрева.

В работе [27] отмечена важная роль нагрева фотосферы и области температурного минимума для возникновения БЭ. Авторы работы [36] нашли увеличение интенсивности в крыльях линий Mg b1 518.3 нм и Fe I 543.45 нм и рассчитали двухкомпонентные модели фотосферы, состоящие из горячего и холодного компонентов. Расчеты сделаны в предположении ЛТР. Оценки по профилям  $I + V$ ,  $I - V$

линии железа  $630.25$  нм дали значение  $0.15$  Тл для напряженности магнитного поля в горячем компоненте модели. В работе [35] проведены спектрополяриметрические наблюдения БЭ и получены параметры Стокса двух хромосферных линий инфракрасного триплета Ca II и двух фотосферных линий Fe I  $849.7$  и  $853.8$  нм. Полуэмпирические модели рассчитывались методом инверсии с учетом отклонений от ЛТР по линии Ca II и по линиям железа при условии ЛТР. Особенностью этих моделей является наличие слоев с повышенной температурой. В слое, находящемся между верхней фотосферой и нижней хромосферой, в моделях имеются нисходящие движения со скоростью примерно  $10$  км/с. Многие исследователи отмечают необходимость дальнейших спектрополяриметрических исследований БЭ.

В нашей работе [2] представлены результаты спектрополяриметрических наблюдений бомбы Эллерамана 4 июля 2009 г. в активной области NOAA 11024 на солнечном франко-итальянском телескопе THEMIS (Испания, Канарские о-ва, Генерифе) в MTR-режиме (multiline spectroscopy mode). В работе найдено, что профили параметра Стокса  $I$  фотосферных линий сильно отличаются от профилей линий невозмущенной фотосферы, что может свидетельствовать об изменении термодинамических параметров в фотосфере БЭ. Профили параметров Стокса для разных сечений области БЭ значительно различаются. Параметры Стокса  $Q$ ,  $U$ ,  $V$  оказались значительно увеличенными по сравнению с этими параметрами для микровспышки балла ВЗ. На основе полученных в работе [2] профилей параметров Стокса фотосферных линий в данной работе выполнено моделирование фотосферы БЭ, рассчитаны полуэмпирические двухкомпонентные модели с помощью программы SIR [28].

### ПОЛУЭМПИРИЧЕСКИЕ ФОТОСФЕРНЫЕ МОДЕЛИ БОМБЫ ЭЛЛЕРМАНА

В данной работе для моделирования фотосферы бомбы Эллерамана использованы спектры, полученные на телескопе THEMIS в  $10^h 10^m 18^s$ ,  $10^h 10^m 32^s$ ,  $10^h 10^m 47^s$ ,  $10^h 11^m 01^s$ ,  $10^h 11^m 15^s$ ,  $10^h 11^m 26^s$  UT. Модели рассчитывались для сечения Б в центральной части БЭ (рис. 3 из работы [2]). В расчетах использованы профили параметров Стокса пяти фотосферных линий железа, титана и никеля. Их характеристики приведены в работе [2]. Вычислялись профили параметров Стокса  $I$ ,  $Q$ ,  $U$ ,  $V$  для линий Fe I  $630.15$  и  $630.25$  нм, Ni I  $611.11$  нм и профили параметра Стокса  $I$  для линий Fe I  $630.34$  нм и Ti I  $630.38$  нм. Для последних линий, имеющих малую магнитную чувствительность, параметры  $Q$ ,  $U$ ,  $V$  очень малы и находятся в пределах ошибок наблюдений.

Для вычислений методом инверсии использована программа SIR (Stokes Inversion based on Response functions) [28]. В программе приня-

то условие локального термодинамического равновесия. Каждая модель включает два компонента: компонент с магнитным полем и немагнитное окружение. В качестве исходной модели первого компонента в расчетах принята Гарвардско-Смитсоновская модель фотосферы HSRA [11]. Макротурбулентные скорости и фактор заполнения (доля площади, занимаемая магнитным компонентом) предполагались постоянными с глубиной. Исходная величина макротурбулентной скорости принималась равной 1.5 км/с, напряженности магнитного поля — 0.01 Тл. В качестве второго компонента модели принята HSRA. При расчетах проводилось согласование наблюдаемых и вычисленных профилей линий до их лучшего совпадения.

На рис. 1 приведены примеры согласования наблюдаемых и вычисленных  $I$ -,  $Q$ -,  $U$ -, и  $V$ -профилей линий Fe I 630.15 и 630.25 нм для момента  $10^h 11^m 15^s$ . В результате расчетов для всех моментов наблюдений получены распределения температуры, напряженности и угла наклона вектора магнитного поля, а также лучевой скорости в магнитной силовой трубке. Доля площади магнитной составляющей моделей составляла 50...65 %, уменьшаясь со временем.

На рис. 2 приведены зависимости температуры  $T$ , величины  $B$  магнитного поля, угла наклона вектора магнитного поля и лучевой скорости  $V_{\text{луч}}$  от оптической глубины в магнитном компоненте моделей для моментов  $10^h 10^m 33^s$ ,  $10^h 10^m 47^s$  и  $10^h 11^m 15^s$  UT. Для остальных моментов наблюдений изменения параметров находятся примерно в таких же пределах. Ошибки определения температуры, напряженности магнитного поля и лучевой скорости составляли в среднем 100 К, 0.02 Тл, 0.3 км/с соответственно.

В полученных моделях магнитной силовой трубки имеются значительные отличия температуры от ее значений в модели невозмущенной фотосферы (рис. 2, а). Распределения неоднородны по высоте, в них имеются слои с повышенной и пониженной температурой. В основном имеются два слоя с повышенной температурой. Отклонение температуры от модельных значений достигает 600...900 К в области  $\lg \tau_{500} = -1$  и 200...700 К в области  $\lg \tau_{500} = -3$ . Учет влияния отклонений от локального термодинамического равновесия может привести к изменению этих значений не более чем на 200 К [34]. Величина  $B$  магнитного поля в моделях силовой трубки постепенно уменьшается с увеличением высоты от 0.1...0.13 Тл при  $\lg \tau_{500} = 0$  до 0.04...0.07 Тл при  $\lg \tau_{500} = -3$  (рис. 2, б). Угол наклона вектора магнитного поля увеличивается от 100 до 150...180° (рис. 2, в). Азимутальный угол изменяется со временем в пределах  $-20...-9^\circ$ , для него принималось постоянное значение. Оценки показывают, что на одном из краев БЭ азимутальный угол имеет положительные значения, достигающие 30°, что свидетельствует о смене знака в области БЭ.

Макротурбулентная скорость составляет 0.8...1.6 км/с в магнитной силовой трубке и 1.2...2.5 км/с в окружающей среде. Распределения лучевой скорости с оптической глубиной имеют схожий вид в раз-

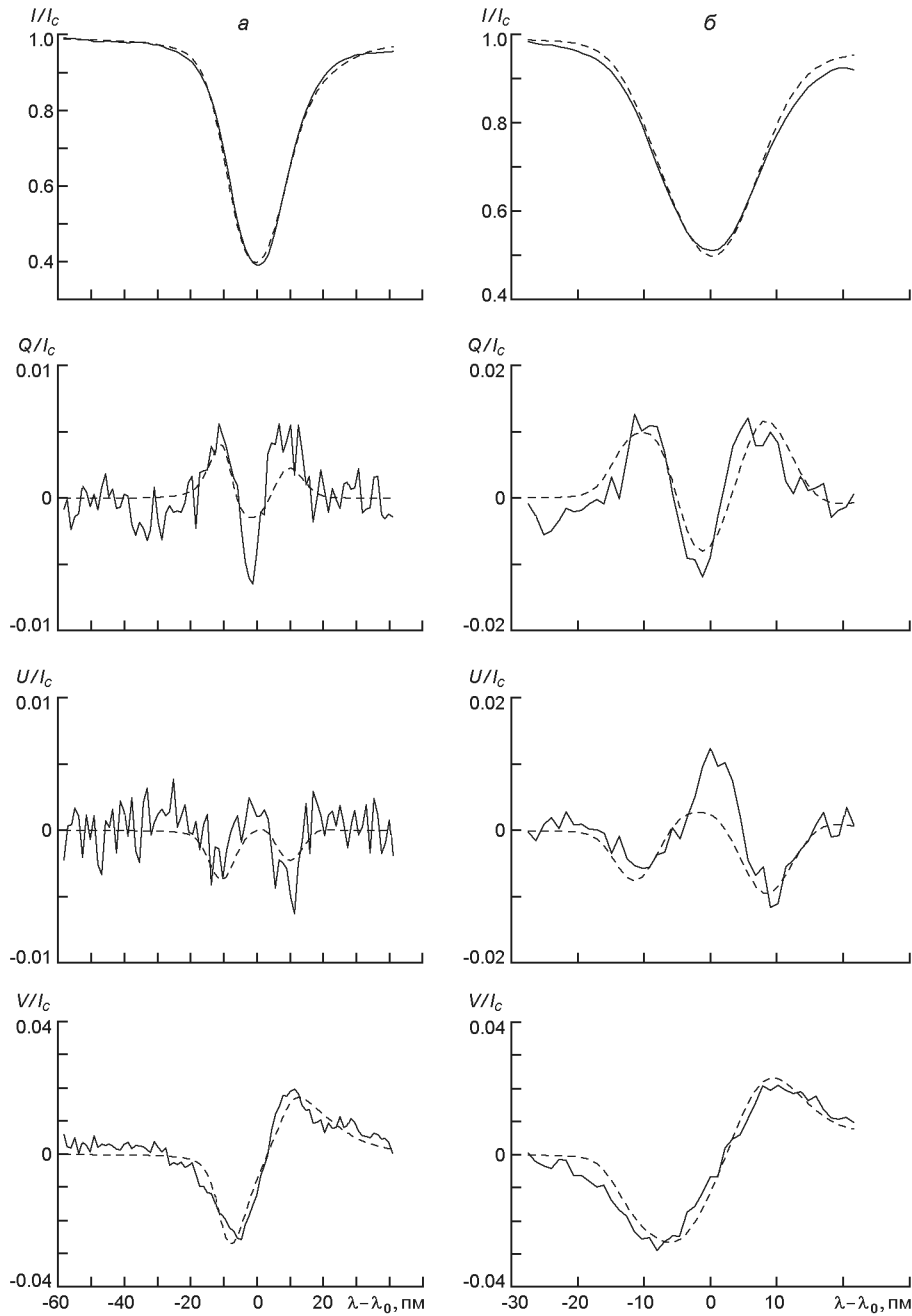


Рис. 1. Наблюдаемые (сплошные линии) и вычисленные (штриховые линии) профили параметров Стокса  $I$ ,  $Q$ ,  $U$ ,  $V$  линий Fe I 630.15 нм (а) и Fe I 630.25 нм (б) для бомбы Эллера в  $10^h 11^m 15^s$  UT

ные моменты наблюдений (рис. 2, з). Согласно полученным моделям трубки в верхних и нижних слоях фотосферы преобладают нисходящие потоки. Лучевые скорости в нижних слоях ( $\lg \tau_5 = 0$ ) изменяются в пределах 2...4 км/с, а в верхних достигают 17 км/с. В средних слоях фотосферы скорости восходящих потоков равны 3...5 км/с. Физичес-

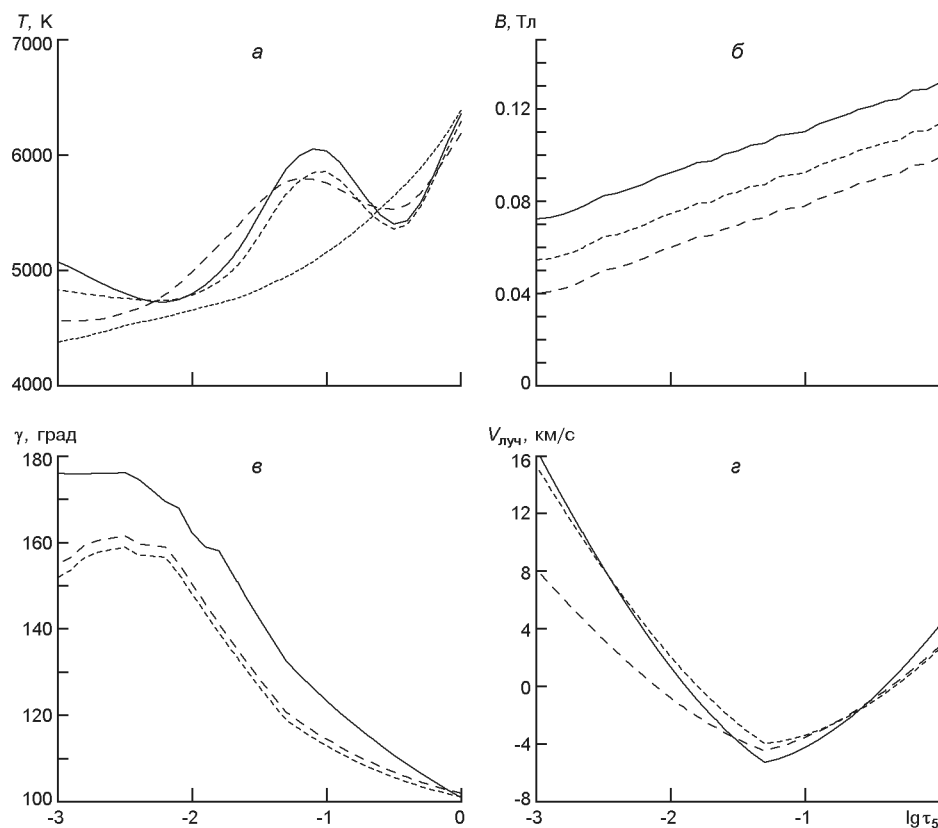


Рис. 2. Зависимости температуры  $T$ , напряженности  $B$  магнитного поля, наклона вектора магнитного поля и лучевой скорости  $V_{\text{луч}}$  в магнитной составляющей моделей фотосферы бомбы Эллермана от логарифма оптической глубины для  $10^h 10^m 33^s$  UT (сплошная линия),  $10^h 10^m 47^s$  UT (длинные штрихи) и  $10^h 11^m 15^s$  UT (короткие штрихи). Для сравнения дана модель невозмущенной фотосферы HSRA (пунктир). Ошибка определения температуры составляет в среднем  $\pm 100$  К. Положительные значения скорости соответствуют направлению движения вещества от наблюдателя

кие параметры фотосферы исследуемой БЭ изменяются со временем нерегулярным образом. Наибольшие значения всех параметров и их отклонений от параметров невозмущенной фотосферы найдены для второго момента наблюдений  $10^h 10^m 33^s$ .

## ОБСУЖДЕНИЕ

Исследуемая в данной работе бомба Эллермана возникла в молодой активной области NOAA 11024, в которой происходил выход змеевидного магнитного потока. В день наблюдений на телескопе THEMIS 4 июля 2009 г. была главная фаза выхода потока [37]. В активной области возникло много микровспышек, выбросов. Как отмечалось выше, результаты численного моделирования выходящего мелкомасштабного магнитного потока формы морской змеи, его взаимодейст-



вия с магнитным полем активной области, приводящего к магнитным пересоединениям, хорошо описывают образование БЭ. Возможно, изучаемая БЭ развивалась по такому сценарию.

Выполненное в данной работе моделирование фотосферы БЭ подтверждает результаты работ [35, 36] и др., в которых выявлены значительные отклонения термодинамических параметров фотосферы БЭ от их значений для невозмущенной фотосферы. В работе [4] проведены наблюдения трех БЭ на Вакуумном башенном телескопе (VTT) одновременно в линии H на спектрометре TESOS и в двух инфракрасных фотосферных магниточувствительных линиях железа на поляриметре TIR II. Было проанализировано поведение параметров Стокса этих линий и выявлено их изменение в процессе развития БЭ. Модели, полученные на основе наблюдений, показали, что нагрев атмосферы происходил на высотах 300...800 км, напряженность магнитного поля достигала 0.18 Тл, фактор заполнения уменьшался по мере развития БЭ [4].

В работе [39] проанализировано пространственное распределение напряженности магнитного поля, угла наклона вектора магнитного поля, лучевой скорости. Для этого использованы данные магнитографических наблюдений в линиях Fe I 630.15 и 630.25 нм. Была найдена связь большинства БЭ с выходящими магнитными силовыми трубками. Выявлено, что БЭ располагаются в областях с напряженностью магнитного поля 0.05...0.1 Тл. Угол наклона магнитных силовых линий был близок к 90°. Азимутальный угол изменялся в исследуемой области от -20 до +20°. Найдено, что БЭ локализуются на границах лучевых скоростей противоположного направления.

В работе [35] получены распределения с высотой температуры, напряженности магнитного поля, лучевой скорости, угла наклона вектора магнитного поля. Результаты, полученные в нашей работе, неплохо согласуются с данными модели для точки Б из [35]. Распределения температуры неоднородны по высоте, имеются слои повышенной температуры. Напряженность магнитного поля уменьшается с высотой. Наклон вектора магнитного поля изменяется в пределах 100...150°. В верхней фотосфере модели показывают нисходящие потоки с высокой скоростью. Подобные скорости в верхней фотосфере получены также в работе [10].

## ВЫВОДЫ

В статье приведены результаты моделирования фотосферных слоев бомбы Эллера в активной области NOAA 11024 на основе профилей параметров Стокса линий железа, титана и никеля, полученных из спектрополяриметрических наблюдений на франко-итальянском телескопе THEMIS. Моделирование осуществлялось методом инверсии с помощью программы SIR при условии локального термодинамичес-

кого равновесия. Получены зависимости термодинамических параметров и параметров магнитного поля от оптической глубины для магнитной силовой трубки. Фактор заполнения изменялся в пределах 50...65 %.

Модели показывают, что физическое состояние фотосферы БЭ сильно отличалось от состояния спокойной фотосферы и изменялось в процессе развития БЭ. Примечателен немонотонный характер изменения температуры с оптической глубиной. В температурных распределениях имеются слои с повышенной и пониженной температурой. Увеличение температуры в БЭ относительно ее значений для невозмущенной фотосферы достигает 700...900 К.

Напряженность магнитного поля в моделях изменяется от 0.1...0.13 Тл в нижних слоях фотосферы до 0.04...0.07 Тл — в верхних. Угол наклона вектора магнитного поля увеличивается с высотой. Азимутальный угол изменяется в пределах  $-20...-9^\circ$ .

Зависимости лучевой скорости от оптической глубины в магнитной составляющей полученных моделей также изменялись со временем. В средних слоях фотосферы все полученные модели показывают подъем вещества со скоростью  $-5...-3$  км/с, а в верхних и нижних слоях — нисходящие потоки. В верхних слоях скорость достигает 17 км/с.

Исследуемая БЭ, возможно, возникла вследствие магнитных пересоединений при выходе змеевидного магнитного потока и его взаимодействия с магнитным полем активной области.

Автор благодарит Е. В. Хоменко и группу поддержки телескопа THEMIS за помощь с наблюдениями, Р. И. Костыка за предоставление программ обработки данных, авторов программы SIR за ее предоставление.

1. Бабин А. Н., Коваль А. Н. Об исследовании поляризации усов с H $\alpha$ -фильтром // Изв. Крым. астрофиз. обсерватории.—1986.—**75**.—Р. 52—59.
2. Кондрашова Н. Н. Спектрополяриметрическое исследование бомбы Эллермана. I. Наблюдения // Кинематика и физика небес. тел.—2015.—**32**, № 1.—С. 21—32.
3. Archontis V., Hood A. W. Formation of Ellerman bombs due to 3D flux emergence // Astron. and Astrophys.—2009.—**508**.—P. 1469—1483.
4. 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**.—id.A102, 16 p.
5. Berlicki A., Heinzel P., Avrett E. H. Photometric analysis of Ellerman bombs // Mem. Soc. Astron. Ital.—2010.—**81**.—P. 646—652.
6. Cheung M. C. M., Schüssler M., Tarbell T. D., Title A. M. Solar surface emerging flux regions: a comparative study of radiative MHD modeling and Hinode SOT observations // Astrophys. J.—2008.—**687**, N 2.—P. 1373—1387.
7. 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.
8. Ellerman F. Solar hydrogen “bombs” // Astrophys. J.—1917.—**46**.—P. 298—300.

9. Fang C., Tang Y. H., Ding M. D., Chen P. F. Spectral analysis of Ellerman bombs // *Astrophys. J.*—2006.—**643**, N 2.—P. 1325—1336.
10. Georgoulis M. K., Rust D. M., Bernasconi P. N., Schmieder B. Statistics, morphology, and energetics of Ellerman bombs // *Astrophys. J.*—2002.—**575**, N 1.—P. 506—528.
11. Gingerich O., Noyes R. W., Kalkofen W., Cuny Y. The Harvard-Smithsonian reference atmosphere // *Solar Phys.*—1971.—**18**, N 3.—P. 347—365.
12. Henoux J.-C., Fang C., Ding M. D. A possible mechanism for the broad wings emission of Ellerman bombs // *Astron. and Astrophys.*—1998.—**337**.—P. 294—298.
13. Hong J., Ding M. D., Li Y., et al. Spectral observations of Ellerman bombs band fitting with a two-cloud model // *Astrophys. J.*—2014.—**792**, N 1.—10 p.
14. Isobe H., Tripathi D., Archontis V. Ellerman bombs and jets associated with resistive flux emergence // *Astrophys. J.*—2007.—**657**, N 1.—P. L53—L56.
15. Kashapova L. K. A spectropolarimetric study of Ellerman bombs // *Astron. Report.*—2002.—**46**, N 12.—P. 918—924.
16. Kitai R. On the mass motions and the atmospheric states of moustaches // *Solar Phys.*—1983.—**87**.—P. 135—154.
17. Li Z., Fang C., Guo Y., et al. Diagnostics of Ellerman bombs with high-resolution spectral data // 2015.—**15**, N 9.—id 1513.
18. Matsumoto T., Kitai R., Shibata K., et al. Height dependence of gas flows in an Ellerman bomb // *Publs Astron. Soc. Jap.*—2008.—**60**, N 1.—P. 95—102.
19. Matsumoto T., Kitai R., Shibata K., et al. Cooperative observation of Ellerman bombs between the Solar Optical Telescope aboard Hinode and Hida/Domless Solar Telescope // *Publs Astron. Soc. Jap.*—2008.—**60**, N3.—P. 577—584.
20. 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.—article id. 19. 9 p.
21. Nelson C. J., Shelyag S., Mathioudakis M., et al. Ellerman bombs — evidence for magnetic reconnection in the lower solar atmosphere // *Astrophys. J.*—2013.—**779**, N 2.—article id. 125.—10 p.
22. Pariat E., Aulanier G., Schmieder B., et al. Resistive emergence of undulatory flux tubes // *Astrophys. J.*—2004.—**614**, N 2.—P. 1099—1112.
23. Pariat E., Masson S., Aulanier G. Current buildup in emerging serpentine flux tubes // *Astrophys. J.*—2009.—**701**, N 2.—P. 1911—1921.
24. Pariat E., Masson S., Aulanier G. 3D MHD simulation of current intensification along serpentine emerging magnetic fields // *ASP Conf. Ser.*—2012.—**455**.—P. 177. —(4<sup>th</sup> Hinode Science Meeting: Unsolved Problems and Recent Insights, Proc. of a conf. held 11—15 October 2010 in Palermo, Italy / Eds L. R. Bellot Rubio, F. Reale, M. Carlsson).
25. Pariat E., Schmieder B., Berlicki A., et al. Spectrophotometric analysis of Ellerman bombs in the Ca II, H $\alpha$ , and UV range // *Astron. and Astrophys.*—2007.—**473**, N 1.—P. 279—289.
26. Parker E. N. The dynamical state of the interstellar gas and field // *Astrophys. J.*—1966.—**145**, N 3.—P. 811—833.
27. Qiu J., Ding M. D., Wang H., et al. Ultraviolet and emission in Ellerman bombs // *Astrophys. J.*—2000.—**544**, N 2.—L157—L161.
28. Ruiz Cobo B., del Toro Iniesta J. C. Inversion of Stokes profiles // *Astrophys. J.*—1992.—**398**.—P. 375—385.
29. Rust D. M., Keil S. L. A search for polarization in Ellerman bombs // *Solar Phys.*—1992.—**140**.—P. 55—65.

30. *Rutten R. J., Vissers G. J. M., Rouppe van der Voort L. H. M., et al.* Ellerman bombs: fallacies, fads, usage // *J. Phys. Conf. Series.*—2013.—**440**, N 1.—id. 012007.
31. *Schmieder B., Pariat E., Aulanier G., et al.* Flare Genesis Experiment: magnetic topology of Ellerman bombs // *Solar variability: from core to outer frontiers (The 10<sup>th</sup> European Solar Physics Meeting, 9—14 Sept. 2002, Prague, Czech. Republic / Ed. A. Wilson).* — Noordwijk: ESA Publ. Division, 2002.—Vol. 2.—P. 911—914.
32. *Schmieder B., Rust D. M., Georgoulis M. K., et al.* Emerging flux and the heating of coronal loops // *Astrophys. J.*—2004.—**601**, N 1.—P. 530—545.
33. *Severny A. B.* Fine structure in solar spectra // *The Observatory.*—1956.—**76**.—P. 241—242.
34. *Shchukina N., Trujillo Bueno J.* The iron line formation problem in three-dimensional hydrodynamic models of solar-like photospheres // *Astrophys. J.*—2001.—**550**, N 2.—P. 970—990.
35. *Sokas-Navarro H., Martinez 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. *Stellmacher G., Wiehr E.* Modelling the moustache phenomenon in network regions // *Astron. and Astrophys.*—1991.—**251**, N 2.—P. 675—679.
37. *Valori G., Green L. M., Demoulin 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**, N 1.—id. 32.—14 p.
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**, N 1.—P. 736—746.
40. *Watanabe H., Vissers G., Kitai R., et al.* Ellerman bombs at high resolution. I. Morphological evidence for photospheric reconnection // *Astrophys. J.*—2011.—**736**, N 1.—12 p.
41. *Xu X-Y., Fang C., Ding M. D., Gao D-H.* Numerical simulations of magnetic reconnection in the lower solar atmosphere // *Res. Astron. and Astrophys.*—2011.—**11**, N 2.—P. 225—236.

Статья поступила в редакцию 26.03.15