

УДК 523.985.3

**Э. А. Барановский¹, Н. Н. Кондрашова²,
М. Н. Пасечник², В. П. Таращук¹**

¹Научно-исследовательский институт «Крымская астрофизическая обсерватория»
п. Научный, Крым, 98409
edward@crao.crimea.ua

²Главная астрономическая обсерватория Национальной академии наук Украины
ул. Академика Заболотного 27, Киев, 03680
rita@mao.kiev.ua

Физические условия в хромосфере солнечной двухленточной вспышки, сопровождавшейся выбросом. II

Выполнено моделирование хромосферы двухленточной вспышки 4 сентября 1990 г., сопровождавшейся выбросом, на основе данных спектральных наблюдений линии H α , полученных на солнечном горизонтальном телескопе АЦУ-26 ГАО НАН Украины (Приэльбрусье, п. Терскол, 3100 м). Полуэмпирические модели рассчитаны для трех моментов наблюдений начальной стадии развития вспышки, которые относились к фазе постепенного роста интенсивности мягкого рентгеновского излучения. Рассмотрено изменение физических параметров плазмы в разных частях выброса (в центре и на краю) и узлах вспышки, на которые он проецировался. Моделирование выполнялось с помощью двух- или трехкомпонентных моделей хромосферы путем согласования наблюдаемых и вычисленных профилей линии. Дополнительные компоненты моделей, фактор заполнения которых составлял от 2 до 15 %, оказались необходимыми для объяснения значительной эмиссии в крыльях линии. Расчеты показали, что в этих компонентах температура в нижнем слое хромосферы увеличена на 1000—3500 К по сравнению с температурой в модели спокойного Солнца VAL-C. Определены лучевые скорости, объясняющие особенности асимметрии профилей. В большинстве полученных моделей движение основной массы вещества в верхней и нижней хромосфере направлено к наблюдателю. Скорость в верхней хромосфере изменялась от –100 до –15 км/с, а в нижней — не превышала –40 км/с. В отдельные периоды времени в центральной части выброса в средней хромосфере скорость от наблюдателя составляла 15 км/с. Дополнительные компоненты показали наличие противоположно направленных

ных потоков со скоростью до -100 км/с к наблюдателю и $50-160$ км/с от наблюдателя.

ФІЗИЧНІ УМОВИ У ХРОМОСФЕРІ СОНЯЧНОГО ДВОСТРІЧКОВОГО СПАЛАХУ, ЯКИЙ СУПРОВОДЖУВАВСЯ ВИКИДОМ. II, Барановський Е. О., Кондрашова Н. М., Пасечник М. М., Таращук В. П. — Виконано моделювання хромосфери двострічкового спалаху 4 вересня 1990 р., який супроводжувався викидом, на основі даних спектральних спостережень лінії H α , отриманих на сонячному горизонтальному телескопі АЦУ-26 ГАО НАН України (Приельбрусся, п. Терскол, 3100 м). Напівемпіричні моделі розраховано для трьох моментів спостережень початкової стадії розвитку спалаху поступової фази зростання інтенсивності м'якого рентгенівського випромінювання. Розглянуто зміни фізичних параметрів плазми в різних частинах викиду (в центрі і на краю) і вузлах спалаху, на які він проектувався. Моделювання виконувалося за допомогою дво- або трикомпонентних моделей хромосфери шляхом узгодження спостережуваних і обчислених профілів лінії. Додаткові компоненти моделей, фактор заповнення яких становив від 2 до 15 %, виявилися необхідними для пояснення значної емісії в крилах лінії. Розрахунки показали, що в цих компонентах температура в нижньому шарі хромосфери збільшена на $1000-3500$ К у порівнянні з температурою у моделі спокійного Сонця VAL-C. Визначено променеві швидкості, які пояснюють особливості асиметрії профілів. У більшості отриманих моделей рух основної маси речовини у верхній і нижній хромосфері спрямовано до спостерігача. Швидкість у верхній хромосфері змінювалася від -100 до -15 км/с, а в нижній — не перевищувала -40 км/с. В окремі періоди часу в центральній частині викиду в середній хромосфері швидкість від спостерігача становила 15 км/с. Додаткові компоненти показали наявність протилежно спрямованих потоків зі швидкістю до -100 км/с до спостерігача і $50-160$ км/с від спостерігача.

PHYSICAL CONDITIONS IN THE CHROMOSPHERE OF A SOLAR TWO-RIBBON FLARE ACCOMPANIED BY A SURGE. II, by Baranovsky E. A., Kondrashova N. N., Pasechnik M. N., Tarashchuk V. P. — The modeling of the chromosphere of the two-ribbon flare which took place on 4 September 1990 and was accompanied by a surge is performed on the basis of spectral observations obtained at the solar horizontal telescope ATsU-26 at the Terskol Peak Observatory. Semiempirical models were calculated for three moments of the flare at the phase of soft X-ray radiation intensity gradual increase. The changes in the plasma physical parameters in different parts of the surge (in the center and on the edge) and flare kernels to which it was projected were studied. The modeling was carried out using two- or three-component models chromosphere by matching the observed and calculated line profiles. Additional components of the models with filling factors from 2 to 15 % were necessary for explanation of the significant

emission in the line wings. Our calculations showed that the temperature of these components in the lower layers of the chromosphere was increased by 1000—3500 K as compared to the temperature in the quiet Sun (VAL-C model). Line-of-sight velocities are determined which explain the pattern of the profile asymmetries. In most of the obtained models matter motion bulk in the upper and lower chromosphere is directed towards the observer. The velocities in the upper chromosphere varied from –100 km/s to –15 km/s, and in the lower one they did not exceed –40 km/s. In some periods in the middle chromosphere of the surge central part the velocity from the observer was 15 km/s. Additional components showed the presence of oppositely directed flows with velocities to –100 km/s towards the observer and 50—160 km/s from the observer.

ВВЕДЕНИЕ

Данная работа является продолжением исследования физических условий в хромосфере активной области (АО) NOAA 6233 на разных стадиях двухленточной вспышки балла 2N/C9 4 сентября 1990 г., сопровождавшейся выбросом [1—4]. В нашей предыдущей работе [1] рассмотрено изменение термодинамических параметров хромосферы в самом начале вспышки, на стадии быстрого роста рентгеновского излучения.

Как отмечено в работе [1], термодинамические параметры хромосферы в выбросах изучены мало, в большинстве работ обычно определена скорость выбросов. Как правило, приводятся лишь средние значения температуры и давления. Так, в работе [10] приведены температура возбуждения, давление, плотность в разных частях хромосферного выброса 19 марта 1989 г. в активной области 5395. Установлено, что в выбросе вещество имело более высокую температуру и плотность, чем в его окружении. В среднем температура возбуждения в нем составляла около 8500 К, электронное давление — 2.3 мПа. Авторы работы [8] выявили спиральные движения в этом же выбросе и пришли к выводу о наличии резкого градиента плотности между выбросом и окружающей его средой. В работе [9] с помощью Solar Dynamics Observatory (SDO) в длине волны 30.4 нм изучен выброс 25 августа 2011 г. в активной области NOAA AR 11271. Найдено, что максимальная скорость выброса составляла 100 км/с. Измерены температура и плотность, средние значения которых составляли 2.0 МК и $4.1 \cdot 10^9 \text{ см}^{-3}$. Обнаружено распространение вдоль выброса холодной плазмы и ее перемешивание с горячей корональной плазмой. Авторы работы предположили, что выброс вызван магнитным пересоединением и нагревом в нижней хромосфере. Выявлены осцилляции излучения вблизи основания выброса, которые могут быть проявлением импульса, генерируемого пересоединением. Авторы построили численную модель, в которой в качестве триггера выброса предположили тепловой импульс,

который на больших высотах переходит в ударную волну, вызывающую возмущения в плазме. В работе [12] исследовался выброс в активной области NOAA 10486, в хромосфере в линии Ca II H и в переходном слое в полосах 19.5 и 160 нм. Температура газа в выбросе была 10^4 — 10^5 К, скорость — 50 км/с. Предполагается, что триггером выброса явилось магнитное пересоединение. В работе [7] выполнено численное 2.5D-МГД-моделирование процесса формирования выбросов в результате магнитного пересоединения в нижней атмосфере Солнца. Получены значения их температуры (20—30 кК) и скорости (40 км/с) в хромосфере в случае однородного магнитного поля с напряженностью 0.0025 Тл и плотности плазмы $2 \cdot 10^{11}$ см⁻³. Отмечено, что магнитное пересоединение может быть эффективным механизмом генерации хромосферных выбросов. В работе [11] сообщается о многоволновых наблюдениях гигантского выброса с помощью внеземных телескопов Hinode и TRACE. В выбросе наблюдались два компонента: горячий ($5 \cdot 10^6$ К) и холодный (10^4 К). Численное 2D-МГД-моделирование, основанное на данных наблюдений, показывает, как нагреваются и ускоряются выбросы в процессе магнитных пересоединений.

Как известно, выбросы очень часто связаны со вспышками. В работе [8] отмечается сложность разделения эмиссии от вспышек и выбросов и указывается на необходимость использования двухкомпонентной модели в этом случае.

В нашей предыдущей работе [1] исследовано физическое состояние хромосферы в области вспышки 4 сентября 1990 г., сопровождавшейся выбросом, на стадии быстрого роста рентгеновского излучения. При анализе наблюдаемых профилей линии H выявлена их сильная асимметричность и наличие значительной эмиссии в крыльях. Для объяснения этих особенностей рассчитаны двухкомпонентные модели. Получены распределения температуры, давления и лучевой скорости по высоте в каждой из моделей. В одном из компонентов этих моделей, занимающем от 5 до 12 % общей площади, имеется глубокий прогрев солнечной атмосферы, который объясняет эмиссию в крыльях линии H. На основе моделирования показано, что в этом компоненте моделей температура увеличена на 1000—2500 К по сравнению с моделью VAL-C.

В данной работе представлены результаты изучения физических условий в области хромосферы вспышки и выброса для следующей стадии развития вспышки 4 сентября 1990 г. Выполнено моделирование хромосферы для фазы постепенного роста рентгеновского излучения вспышки.

НАБЛЮДАТЕЛЬНЫЙ МАТЕРИАЛ

Спектральные наблюдения активной области NOAA 6233 были выполнены Т. И. Редюк 4 сентября 1990 г. на солнечном горизонтальном

телескопе АЦУ-26 ГАО НАН Украины (Кавказ, пик Терскол, 3100 м). Наблюдения и фотометрическая обработка спектров подробно описаны в работах [2, 3]. Активная область находилась на западном краю солнечного диска. Двухленточная Н -вспышка началась в $7^h 41^m$ UT, максимум ее наступил в $8^h 06^m$ UT, окончилась вспышка примерно в 9^h UT. Согласно данным GOES рост потока рентгеновского излучения вспышки в диапазонах 0.05—0.4 нм и 0.1—0.8 нм начался примерно в $7^h 57^m$ и продолжался примерно 14—15 мин. Максимум его интенсивности в диапазоне 0.05—0.4 нм зарегистрирован в $8^h 10^m 48^s$, а в диапазоне 0.1—0.8 нм) в $8^h 12^m$. До $8^h 03.3^m$ наблюдалось резкое увеличение потока со временем (быстрая фаза), затем до самого максимума вспышки оно было постепенным.

В процессе наблюдений на телескопе АЦУ-26 щель спектрографа пересекала участок АО, включающий четыре узла одной из лент

вспышки и выброс, ассоциируемый с этой вспышкой. В данной работе использованы спектры, полученные в $8^h 03^m 27^s$, $8^h 04^m 14^s$, $8^h 05^m 33^s$. Фотометрические сечения спектров были сделаны в области линии Н с шагом 0.1—0.3 мм, что соответствует расстоянию 0.85—2.55 Мм на поверхности Солнца.

На рис. 1 показаны изменения интенсивности поперек дисперсии в центре линии Н и в ее синем крыле с указанием положения выброса для рассматриваемых моментов наблюдений. Выброс проецировался на узлы вспышки, они отмечены буквами А, Б, В, Г. Вертикальными линиями на рисунке обозначены места сечений АО, использованных в данной работе. Сечение 1 проходит через край выброса, а сечения 2, 3 — через его центральную часть. Последние два сечения от-

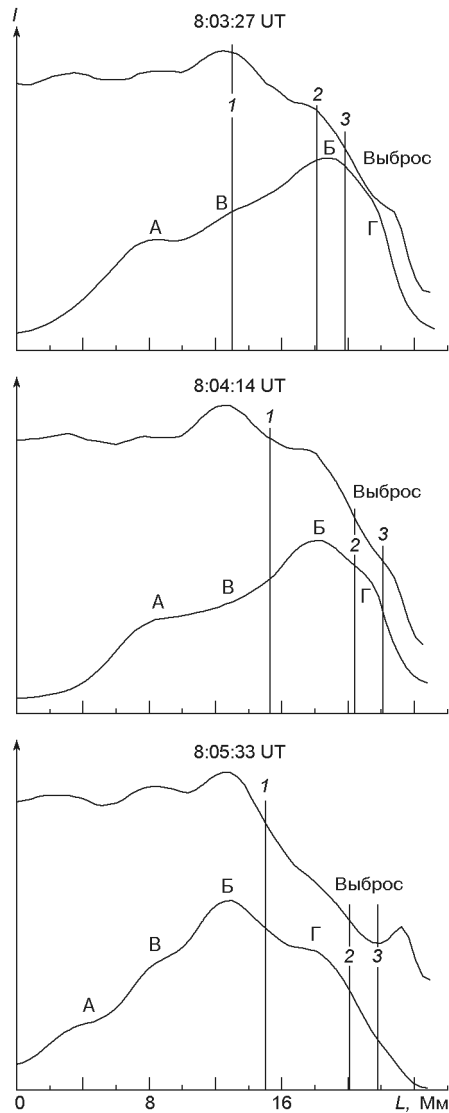


Рис. 1. Изменение интенсивности I в центре линии Н (нижняя линия) и в ее синем крыле (верхняя линия) вдоль разреза активной области в $8^h 03^m 27^s$, $8^h 04^m 14^s$, $8^h 05^m 33^s$ UT. А, Б, В, Г — эмиссионные ядра вспышки. Сечение 1 — край выброса, 2 и 3 — центр выброса

носятся к местам максимальной лучевой скорости, определенной по доплеровским сдвигам центра линии H α . Необходимо заметить, что направление движения выброса в исследуемые три момента наблюдений изменялось, очевидно потому, что изменялась конфигурация магнитного поля вспышки. Известно, что выброс плазмы происходит в направлении уменьшения напряженности магнитного поля [5].

В результате обработки получены профили линии H α для этих сечений. Они обнаруживают значительную эмиссию в крыльях, как и профили для фазы быстрого роста рентгеновского излучения вспышки [1]. Профили для края выброса и его центра значительно различаются также по величине остаточной интенсивности, ширине и асимметрии. Выполнено моделирование хромосферы активной области. В соответствии с особенностями профилей получены распределения температуры и лучевой скорости с глубиной в компонентах моделей.

ПОЛУЭМПИРИЧЕСКИЕ ХРОМОСФЕРНЫЕ МОДЕЛИ ВСПЫШКИ И ВЫБРОСА

Методика вычисления полуэмпирических моделей описана в работе [6] и такова же, как и в работе [1]. Расчеты велись по программе типа ПАНДОРА, учитывались отклонения от локального термодинамического равновесия. Численно решались уравнения переноса и стационарности для атома водорода с восьмью уровнями и континуумом, учитывались механизмы уширения линий. Вычисления продолжались до наилучшего согласования вычисленных и полученных из наблюдений профилей линии H α . Как и в работе [1], в начале вычислений предполагалось, что каждая из моделей состоит из двух компонентов. Необходимость использования в расчетах двухкомпонентных моделей обоснована в [1]. В результате вычислений получены зависимости температуры, плотности, турбулентной скорости, лучевой скорости от высоты в компонентах моделей. Второй компонент модели позволил объяснить наблюдаемую значительную эмиссию в крыльях линии H α . Он занимает небольшую часть общей площади и характеризуется прогревом нижних слоев хромосферы. Необходимо заметить, что профили линии, полученные из наблюдений в 8^h04^m14^s, 8^h05^m33^s для центральной части выброса, сильно асимметричны, и для их хорошего описания потребовались трехкомпонентные модели.

Полученные в результате расчетов зависимости температуры и лучевой скорости от глубины хромосферы приведены на рис. 2—4. Точность расчетов температуры 300 К, лучевой скорости — около 7 км/с, остаточной интенсивности r — 0.5 %. В верхней строке рис. 2—4 приведены профили линии H α , полученные из наблюдений и вычисленные; в средней строке приведены зависимости температуры от колонковой плотности m в компонентах моделей; в нижней строке показаны зависимости лучевой скорости от оптической

глубины атмосферы в линии L . Для сравнения дана также модель невозмущенного Солнца VAL-C [13]. На рис. 2—4, *a* приведены данные, полученные для края выброса (сечение 1 на рис. 1), рис. 2—4, *б, в* — для центральной части выброса (сечения 2, 3 соответственно). На рис. 2 приведены данные для момента наблюдений $8^h03^m27^s$ UT. Фотометрический разрез 1 проходил через край выброса и слабый узел В, а разрезы 2 и 3 — через центр выброса и яркий узел Б (рис. 1). Видно, что полученные из наблюдений профили линии H для края и центральной части выброса сильно различаются как величиной центральной остаточной интенсивности (для края она составляет 0.60, для центра 0.68—0.71), так и шириной (для края профиль уже в среднем на 0.05 нм), а также характером асимметрии. Разницу между величиной центральной остаточной интенсивности в сечениях 1 и 2, 3 можно объяснить тем, что они проходили через вспыхивающие узлы разной яркости в линии H . Поэтому полученные из расчетов температурные распределения по высоте в основных компонентах моделей для края и центра выброса оказались разными. Температурные зависимости, полученные для центральной части выброса, (рис. 2, *б, в*) были одинаковыми — значительное увеличение температуры в верхнем слое хромосферы, а в области $10^{-4} < m < 10$ г/см² она почти не отличалась от температуры в модели VAL-C. На краю выброса (рис. 2, *a*) в самых верхних слоях прогрев был значительно меньшим, а в слое $10^{-4.8} < m < 10^{-3.3}$ г/см² температура увеличена на 2000—2500 К по сравнению с моделью VAL-C. Все дополнительные компоненты моделей, рассчитанные как для края, так и для центра выброса, показывают сильный прогрев в верхней хромосфере в области $10^{-5} < m < 10^{-4.4}$ г/см², немного больший, чем в основном компоненте для центра выброса, и значительно больший для края выброса. В средней части хромосферы температура мало отличалась от температуры в модели спокойного Солнца. В нижней хромосфере, в области $10^{-2} < m < 10^{-0.8}$ г/см², получено увеличение температуры на 1000—3500 К по сравнению с моделью VAL-C, что позволило объяснить эмиссию, имеющуюся в крыльях линии H . Фактор заполнения этого компонента составлял около 12 %.

Распределение лучевых скоростей хромосферного вещества с глубиной в центральной части выброса и узле Б показано в нижней строке рис. 2, *б, в*. Согласно полученным моделям в этой области хромосферы в разных ее слоях двигались противоположно направленные потоки. В верхней хромосфере движение было направлено к наблюдателю со скоростью около –15 км/с, в средней ее части направление движения изменилось — вещество двигалось от наблюдателя со скоростью около 15 км/с, в нижних слоях направление движения вещества снова изменилось и скорость его достигала –35 км/с. Такие изменения направления движения вещества с глубиной атмосферы могут свидетельствовать о том, что хромосферное вещество в центре выброса двигалось по спирали. На краю выброса и в узле В вещество двигалось только к наблюдателю со скоростью около –30 км/с в верхнем слое

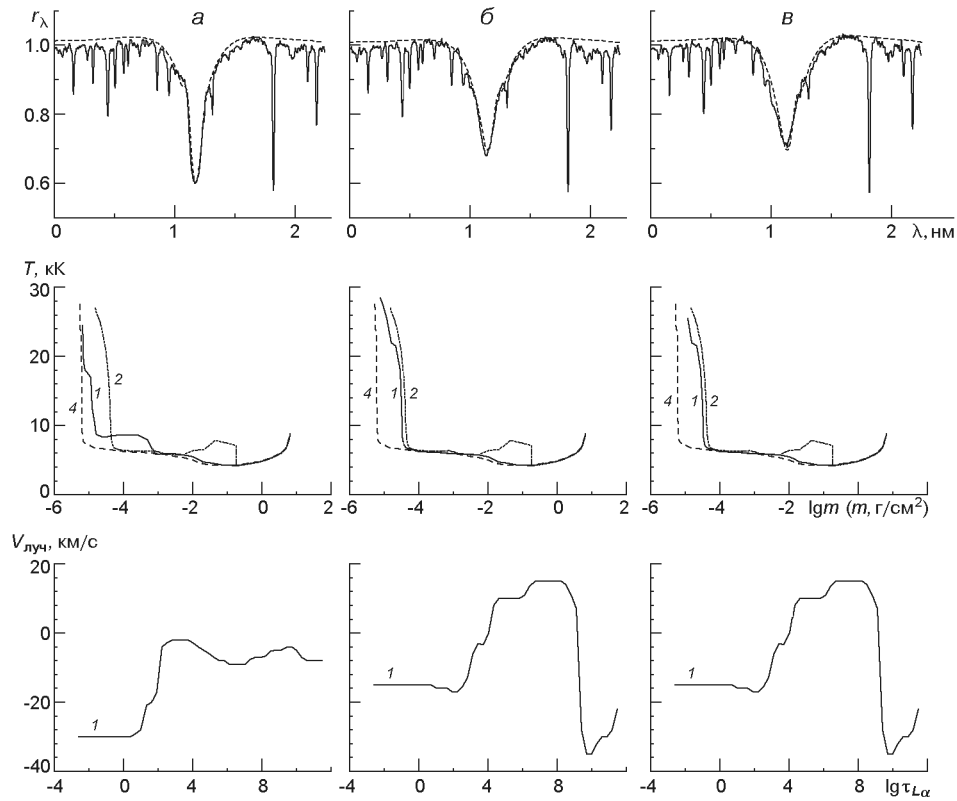


Рис. 2. Верхняя строка — профили r линии H_{β} , полученные из наблюдений (сплошная линия) и вычисленные (штриховая линия); средняя строка — модельные зависимости температуры T от колонковой плотности m ; нижняя строка — зависимости лучевой скорости $V_{\text{луч}}$ от оптической глубины в линии L_{α} . Модели рассчитаны для момента $8^{\text{h}}03^{\text{m}}27^{\text{s}}$ UT (a — для края, b и $в$ — для центра выброса); линия 1 — основной компонент, 2 — дополнительный, 3 — второй дополнительный компонент, 4 — модель VAL-C. Отрицательные значения скорости соответствуют направлению движения вещества к наблюдателю

хромосферы и с гораздо меньшей скоростью от -2 до -9 км/с в среднем и нижнем слое.

Фотометрические разрезы спектра для момента наблюдений $8^{\text{h}}04^{\text{m}}14^{\text{s}}$ UT сделаны для края выброса между узлами вспышки В и Б (рис. 1, сечение 1) и для центра выброса и узла Г (сечения 2, 3). Полученные из наблюдений и вычисленные профили линии H_{β} приведены на рис. 3. Видно, что профиль для края выброса (рис. 3, a) почти симметричный, его центральная остаточная интенсивность составляет 0.55, ширина такая же, как в предыдущий момент. Центральная остаточная интенсивность профилей, полученных из наблюдений для центра выброса, находилась в пределах 0.7—0.72. Профиль линии для разреза 3 (рис. 3, $в$) сильно сдвинут в коротковолновую сторону спектра по отношению к профилю линии для невозмущенной области Солнца, и имеет большую асимметрию в длинноволновом крыле. Как и для первого момента, температурные распределения в основных компонентах моделей, полученных для края и центра выброса, сильно

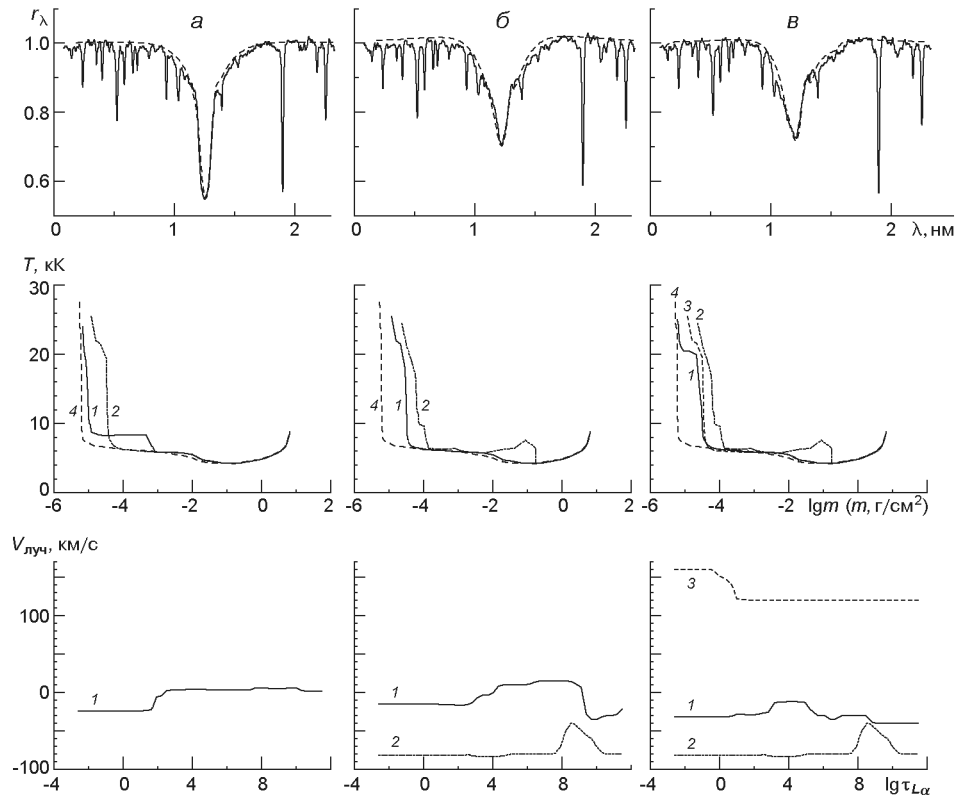


Рис. 3. То же для момента $8^h04^m14^s$ UT

различаются. В центральной части выброса и узле вспышки Г верхняя хромосфера сильно прогрета, а температура в области $10^{-4.5} < m < 10$ г/см² почти не отличалась от температуры в модели VAL-C. На краю выброса температура в области $10^{-3} < m < 10$ г/см² мало отличалась от температуры спокойного Солнца, тогда как в области $10^{-5} < m < 10^{-3}$ г/см² она была больше на 2300—3000 К. Температурные распределения для центра выброса в дополнительных компонентах, которые занимают всего 2—3 % общей площади, одинаковы — сильный прогрев верхней хромосферы до $m = 10^{-3.8}$ г/см² (рис. 3, б, в, линии 2). В нижней хромосфере, как и в моделях для первого момента, наблюдается область с увеличенной (на 2800—3500 К) температурой.

Профиль линии Н_β, полученный для сечения 3, был настолько асимметричным, что для его хорошего описания потребовалось ввести в модель третий компонент с большой скоростью от наблюдателя, который занимал 15.6 % общей площади (рис. 3, в, линия 3). Температурное распределение в этом компоненте отличалось от температурного распределения в основном компоненте более сильным прогревом в верхней хромосфере.

Модели показали, что на краю выброса, между узлами вспышки В и Б, движение вещества было направлено к наблюдателю со скоростью −24 км/с в верхней части хромосферы и от наблюдателя с небольшой скоростью до 6 км/с в средней и нижней хромосфере. В централь-

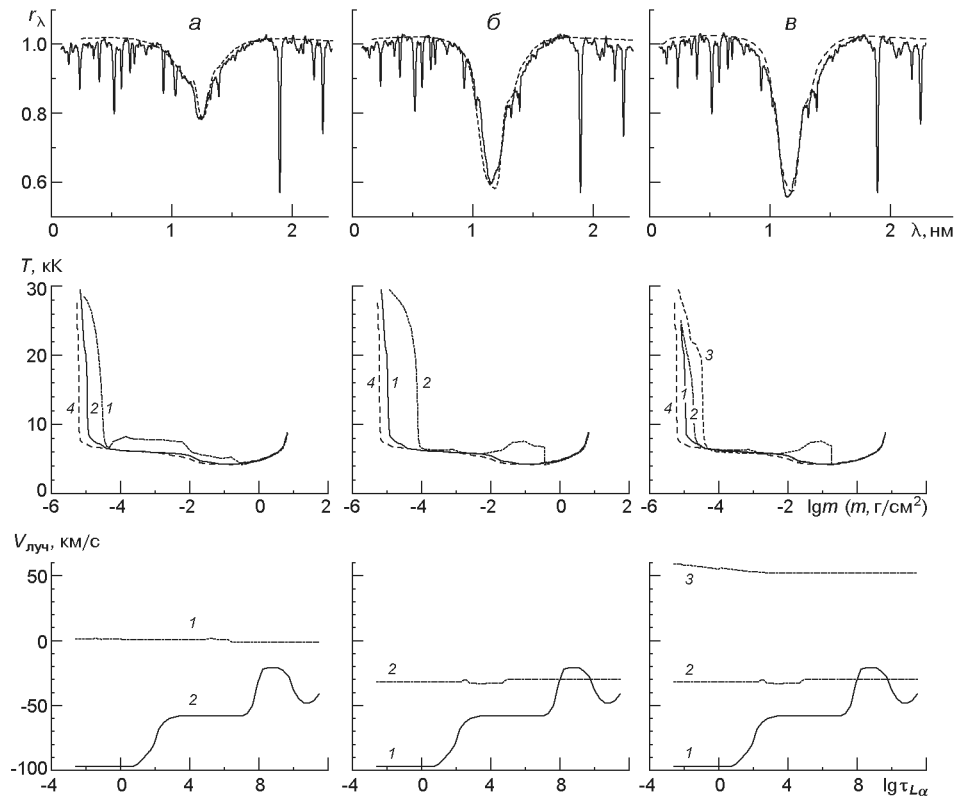


Рис. 4. То же для момента $8^h 05^m 33^s$ UT

ной части выброса и узле Г в сечении 2 основная масса вещества двигалась по спирали, как и в предыдущий момент наблюдений. В дополнительном компоненте модели получены гораздо большие скорости от -82 до -40 км/с. В сечении 3 большая часть хромосферного вещества двигалась к наблюдателю со скоростью около -30 км/с в верхнем слое, около -10 км/с — в среднем слое и около -40 км/с — в нижнем слое. Как и в сечении 2, одна часть плазмы (3 %, — первый дополнительный компонент) двигалась вверх со скоростью около -80 км/с, а еще одна часть вещества (15 %, — второй дополнительный компонент) двигались от наблюдателя со скоростью $120-160$ км/с.

Профили и модели для момента наблюдений $8^h 05^m 33^s$ UT, наиболее близкого к моменту максимума H -вспышки, представлены на рис. 4. Фотометрический разрез 1 проходил через край выброса и край яркого узла Б (рис. 1), а разрезы 2 и 3 проходили через центр выброса и участок активной области возле слабого узла Г. Полученные из наблюдений профили линии H сильно отличаются от профилей для предыдущих двух моментов. Остаточная интенсивность профиля, полученного для края выброса, составляла 0.78, и его полуширина была меньше на 0.08 нм, чем у профиля линии для невозмущенного участка Солнца. Профили для центральной части выброса были в два раза шире, асимметрия их длинноволновых крыльев уменьшилась, а их цент-

ральная остаточная интенсивность находилась в пределах 0.56...0.60. Изменение температуры с глубиной в основных компонентах полученных моделей сильно различалось. В модели для края выброса и яркого узла Б по всей высоте хромосферы температура была значительно большей, чем в модели спокойного Солнца и в моделях для предыдущих моментов (рис. 4, а). В дополнительном компоненте этой модели, который занимал около 5 % всей площади, получен прогрев в основном в самом верхнем слое хромосферы. Температура в основных компонентах моделей для центральной части выброса на большом протяжении высот сравнительно мало отличалась от температуры в модели VAL-C (рис. 4, б, в). В области верхней хромосферы около $m = 10^{-5}$ г/см² отмечается увеличение температуры. В дополнительных компонентах, фактор заполнения которых составлял 9—11 %, имеются две области сильного прогрева: верхняя хромосфера до $m = 10^{-4.1}$ г/см² и ее нижние слои, включая область температурного минимума, ($10^{-2.2} < m < 10^{-0.4}$ г/см²), где температура увеличена на 1000—3400 К по сравнению с ее значениями в модели VAL-C, причем в этой области наблюдался более глубокий прогрев атмосферы по сравнению с прогревом в предыдущие моменты наблюдений. Для сечения 3, как и в 8^h04^m14^s, в модель включен третий компонент, в котором вещество двигалось с большой скоростью около 60 км/с от наблюдателя. Прогрев в его верхних слоях был наибольшим.

Одинаковые зависимости лучевых скоростей были получены в дополнительном компоненте модели хромосферы для сечения 1 и в основных компонентах моделей для сечений 2 и 3 (нижняя строка рис. 4). Видно, что движение направлено к наблюдателю, и скорость уменьшалась с глубиной атмосферы: она достигала почти –100 км/с в верхней хромосфере, –60 км/с в средней хромосфере и –20 км/с в нижней хромосфере. Основной компонент модели в сечении 1 показывает небольшую скорость в пределах –1...+2 км/с (рис. 4, а). Дополнительный компонент моделей для сечений 2 и 3 показал движение вещества к наблюдателю со скоростью около –30 км/с. Скорость движения вещества в третьем компоненте модели составляла около 50 км/с.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

Приведены результаты моделирования хромосферных слоев двухленточной вспышки 4 сентября 1990 г., сопровождавшейся выбросом, на основе наблюдаемых профилей линии H для трех моментов начальной фазы вспышки, относящихся к постепенному увеличению интенсивности мягкого рентгеновского излучения. Развитие вспышки и выброса в этот период имело ряд особенностей по сравнению с их развитием в период быстрого роста рентгеновского излучения, описанным в работе [1]. Так, изменялось направление движения выброса, он проецировался на разные места вспышечной области. Очевидно, с развитием вспышки изменялась конфигурация магнитного поля активной об-

ласти. Наблюдаемые профили линии H α стали более асимметричными, особенно для центральной части выброса и в моменты, близкие к максимуму H α -вспышки. Для их хорошего описания понадобилось ввести в полуэмпирические модели второй дополнительный компонент, т. е. рассчитанные модели состояли из основного и одного или двух дополнительных компонентов, занимающих от 2 до 15 % общей площади. Согласно полученным моделям в исследуемой здесь фазе вспышки существенно изменился характер движения хромосферного вещества. Как в верхних, так и в нижних слоях хромосферы преобладало движение к наблюдателю, тогда как в период быстрого роста мягкого рентгеновского излучения движение вещества к наблюдателю отмечено только в верхней хромосфере, а в нижней хромосфере движение было направлено от наблюдателя. Увеличилась также величина скорости хромосферного вещества.

Рассмотрено изменение термодинамических параметров плазмы в разных частях выброса (в центре и на краю) и узлах вспышки, на которые он проецировался. Расчеты показали, что в основных компонентах моделей распределения температуры с глубиной в центральной части выброса и на его краю значительно различались. В центре выброса верхняя часть хромосферы сильно прогрета, температура нижних слоев сравнительно мало отличалась от температуры в модели спокойного Солнца. На краю выброса верхняя хромосфера прогрета меньше, чем в его центральной части, но прогрев затронул более глубокие слои, где температура увеличена на 2000—3000 К. В дополнительном компоненте моделей температура в нижнем слое хромосферы увеличена на 1000—3500 К по сравнению с моделью VAL-C, что на 1000 К больше, чем в предыдущие моменты наблюдений, рассмотренные в работе [1]. Наиболее глубоко прогрета атмосфера в модели для центра выброса в момент наблюдений 8^h05^m33^s UT, за 30 с до максимума H α -вспышки.

Определены лучевые скорости, объясняющие особенности асимметрии профилей линии H α . Получено, что в верхней хромосфере в большинстве моделей основная масса вещества (основные компоненты) движется к наблюдателю со скоростью от –15 до –100 км/с, в нижней хромосфере тоже преобладало движение к наблюдателю, но скорости здесь не превышали –40 км/с. В средней части хромосферы в некоторых разрезах движение было направлено от наблюдателя со скоростью до 15 км/с. Такие изменения направления движения вещества с глубиной атмосферы свидетельствуют о том, что хромосферное вещество двигалось по спирали. Для момента наблюдений 8^h04^m14^s UT получено, что 15 % вещества двигалось от наблюдателя со скоростью, которая достигала 120—160 км/с.

1. Барановский Э. А., Кондрашова Н. Н., Пасечник М. Н., Таращук В. П. Физические условия в хромосфере солнечной двухленточной вспышки, сопровождавшейся выбросом. I // Кинематика и физика небес. тел.—2013.—29, № 4.—С. 18—30.

2. Кондрашова Н. Н., Пасечник М. Н. Лучевые скорости фотосферного вещества в солнечной вспышке с выбросом // Кинематика и физика небес. тел.—2010.—**26**, № 1.—С. 57—73.
3. Кондрашова Н. Н., Пасечник М. Н. Поле лучевых скоростей в нижней атмосфере солнечной активной области во время вспышки с выбросом. Начальная фаза вспышки // Кинематика и физика небес. тел.—2011.—**27**, № 5.—С. 12—25.
4. Пасечник М. Н. Рух хромосферної речовини активної області під час спалаху з викидом // Вісн. Київ. нац. ун-ту ім. Тараса Шевченка. Астрономія.—2003.— Вип. 39 40.—С. 13—16.
5. Прист Э. Р. Солнечная магнитогидродинамика. — М.: Мир, 1985.—589 с.
6. Avrett E. H., Loeser R. Formation of line and continuous spectra. I. Source-function calculations // Spec. Report SAO.—1969.—N 303.
7. Ding J. Y., Madjarska M. S., Doyle J. G., et al. Magnetic reconnection resulting from flux emergence: implications for jet formation in the lower solar atmosphere? // Astron. and Astrophys.—2011.—**535**.— id. A95.—10 p.
8. Gu X. M., Lin J., Li K. J., et al. Kinematic characteristics of the surge on March 19, 1989 // Astron. and Astrophys.—1994.—**282**.—P. 240—251.
9. Kayshap P., Srivastava A. K., Murawski K. The kinematics and plasma properties of a solar surge triggered by chromospheric activity in AR11271 // Astrophys. J.—2013.—**763**, N 1.—id. 24.—12 p.
10. Li K., Li J., Gu X., Zhong S. H. A quantitative analysis of the surge on March 19, 1989 // Solar. Phys. —1996.—**168**, N1—P. 91—103.
11. Nishizuka N., Shimizu M., Nakamura T., et al. Giant chromospheric anemone jet observed with Hinode and comparison with magnetohydrodynamic simulations: evidence of propagating Alfvén waves and magnetic reconnection // Astrophys. J.—2008.—**683**, N 1.—P. L83—L86.
12. Tziotziou K., Tsiropoula G., Sitterlin P. DOT tomography of the solar atmosphere. V. Analysis of a surge from AR 10489 // Astron. and Astrophys.—2005.—**444**.— P. 265—274.
13. Vernazza J. E., Avrett E. H., Loeser R. Structure of the solar chromosphere. III. Models of the EUV brightness components of the quiet Sun // Astrophys. J. Suppl. Ser.—1981.—**45**, N 4.—P. 635—725.

Статья поступила в редакцию 29.04.14