

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ОХЛАЖДЕНИЯ НА ФАЗЕ СПАДА СОЛНЕЧНЫХ И ЗВЕЗДНЫХ ВСПЫШЕК

© 2022 г. И. Д. Мотык<sup>1</sup>, \*, Л. К. Кашапова<sup>1</sup>, \*\*

<sup>1</sup> *Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия*

*\*E-mail: ilymotyk@gmail.com*

*\*\*E-mail: lkk@iszf.irk.ru*

Поступила в редакцию 04.04.2022 г.

После доработки 04.07.2022 г.

Принята к публикации 30.08.2022 г.

Работа посвящена исследованию процессов охлаждения и потери энергии на фазе спада вспышек. Именно во время этой фазы одновременно с процессами охлаждения и потери энергии могут возникать различные волновые процессы, приводящие к дополнительному энерговыделению, что делает ее интересным объектом исследования. Считается, что охлаждение вспышечной плазмы на фазе спада происходит за счет двух процессов – теплопроводности и потерь за счет излучения. В начале доминирует процесс теплопроводности, а затем наступает полное доминирование процесса потерь за счет излучения. Мы провели анализ средних временных профилей солнечных вспышек в полосах SDO/AIA 304, 1600 и 1700 Å и среднего временного профиля вспышки в белом свете карлика спектрального класса M4. Для описания временных профилей была предложена аналитическая модель, основанная на известных формулах поведения температуры. Результаты анализа с помощью разработанной модели показали, что доминирование процесса охлаждения за счет потерь на излучение для полосы SDO/AIA 304 Å наступает раньше, чем это определено в стандартной модели. Для других спектральных полос процесс потерь за счет излучения практически все время доминирует на фазе спада. Сравнение результатов, полученных для вспышек на красном карлике M4 и в солнечных вспышках, показало, что процессы охлаждения в солнечных и звездных вспышках схожи и зависят от структуры атмосферы. Предложенная аналитическая модель может использоваться для разделения классической формы затухания и накладывающихся на нее процессов энерговыделения.

*Ключевые слова:* Солнце, плазма, вспышки

**DOI:** 10.31857/S0004629922100097

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Эволюцию солнечной вспышки можно разделить на два основных этапа: фаза роста, часто называемая импульсной, и фаза спада. Во время фазы роста происходит основное выделение энергии, сопровождаемое быстрым ростом интенсивности излучения в широком диапазоне электромагнитного спектра. Основными характеристиками фазы спада являются охлаждение вспышечной плазмы и постепенное уменьшение интенсивности излучения в различных спектральных диапазонах [1]. Процессы, происходящие во время фазы спада, тесно связаны с параметрами вспышки как явления. Например, как было показано в исследовании [2], скорость спада излучения в момент быстрого остывания в фазе спада говорит о мощности вспышки в максимуме. Несмотря на повышенный интерес к импульсной фазе вспышек [3], энергия, выделяемая как на фазе роста, так и на фазе спада, сравнимы [4]. К тому же на фазе спада

часто начинают проявляться различные волновые процессы [5], что делает ее интересным объектом исследования.

В численных и аналитических моделях солнечных вспышек считается, что фаза спада начинается с момента, когда температура плазмы достигает максимального значения [6]. Существуют различные аналитические модели, описывающие поведение параметров плазмы в фазе спада [6, 7], однако все модели сходятся на том, что в фазе спада работают, в основном, два процесса – теплопроводность и потеря энергии за счет излучения. Наиболее распространенная модель, аналитически описывающая охлаждение плазмы во вспышках, представлена в работе [8]. Согласно этой модели первоначально доминирует процесс теплопроводности, однако, в связи с непостоянной однородностью плазмы процесс теплопроводности ослабевает, и процесс охлаждения за счет излучения начинает доминировать вплоть до

полного остывания вспышки. Считается, что если наступает доминирование потерь за счет излучения, вклад потерь за счет теплопроводности становится пренебрежимо мал. Это связано с тем, что функция изменения температуры при охлаждении за счет теплопроводности показывает более быстрое уменьшение значения температуры, чем за счет охлаждения из-за излучения. Поэтому при комбинации этих двух процессов любой существенный вклад охлаждения за счет теплопроводности не позволит реализовать доминирование охлаждения за счет излучения.

Несмотря на очевидное и достаточно однозначное описание процессов охлаждения во время фазы спада вспышки, сравнение с наблюдательными данными дает противоречивые результаты. Например, в статье [9] было проведено сравнение наблюдаемого времени остывания солнечных вспышек с теоретическими расчетами, выполненными с помощью модели, приведенной в [8]. Для 72 вспышек класса M и X было обнаружено, что модель предсказывает меньшее время охлаждения для 58 (80%) вспышек, т.е. более быстрое охлаждение. Также доминирование в начале процесса теплопроводности наблюдается только у 28 (20%) вспышек. Это расхождение можно объяснить некими особенностями строения или распределения плазмы в короне, или тем, что наблюдались вспышки со сложным сценарием, подразумевающим наличие источников энергии на фазе спада. Однако результаты исследования более низких слоев излучения также дают результаты, не совсем согласующиеся с теоретическими прогнозами. Исследование классического временного профиля солнечных вспышек в нижних слоях солнечной атмосферы было проведено в работе [10]. Основной целью работы было создание усредненных профилей и их аналитических представлений для излучения солнечной вспышки, аналогичных предложенному для белого света красного карлика GJ 1243 спектрального класса M4 [11]. Для создания средних временных профилей были использованы временные профили в полосах 304, 1600 и 1700 Å, полученных с помощью инструмента SDO/AIA. Поток для отобранных событий были получены интегрированием интенсивности всего диска, чтобы воспроизвести поток Солнца как звезды. Далее каждый временной профиль был нормирован на максимум потока, таким образом максимальное значение потока для временных профилей всех вспышек равен единице. Момент времени, который ему соответствует, был выбран за нулевое значение на оси времени. Значения времени до этого момента имеют отрицательный знак, после — положительный. Так как целью исследования была фаза спада, то за единицу времени был выбран временной промежуток, за который поток уменьшается на 50% от максимума. Нормированные по интен-

сивности и времени профили были еще раз протестированы на отсутствие значительных увеличений интенсивности на фазе спада. Для событий, используемых для создания среднего временного профиля, увеличения не должны были превышать 30% от максимума. После этого каждый временной профиль был линейно интерполирован на временную сетку с равномерным шагом  $0.01 t_{1/2}$ . Значение среднего временного профиля вычислялось как медианное значение для каждой временной ячейки. При сравнении среднего временного профиля солнечной вспышки в полосе 304 Å SDO/AIA и фазы спада теоретического профиля из работы [12] было обнаружено различие между наблюдениями и теорией. Также анализ средних временных профилей с помощью формул, описывающих эволюцию температуры из работы [8], показал, что процесс затухания лучше описывается функцией процесса потери энергии за счет излучения, чем функцией для процесса теплопроводности. Объяснение того, почему именно температура определяет поведение излучения, можно найти в работе [13] по исследованию звездных вспышек. Анализ наблюдений вспышек звезды AD Leo (спектрального класса M3.5) в оптическом диапазоне показал, что в максимуме яркости вспышки интенсивность можно описать формулой Больцмана для абсолютно черного тела. Таким образом, в течение некоторого периода времени интенсивность может быть представлена как функция от температуры. Однако в работе [10] было проведено фитирование каждого процесса по отдельности, что не позволило выявить момент смены доминирования одного процесса другим, а также ответить на то, за счет чего вспышки могут остывать медленнее, чем предсказывает теория.

Данная работа направлена на устранение этого пробела и продолжение исследования процессов на фазе спада с использованием усредненных профилей солнечной вспышки.

## 2. МОДЕЛЬ И ДАННЫЕ

Одной из сложностей при изучении фазы спада является описание вклада плазмы различной температуры в интенсивность излучения. Общепринято, что интенсивность излучения в спектральных полосах крайнего ультрафиолета определяется как интеграл произведения функции распределения, зависящей от температуры, и распределения количества плазмы с температурой (или дифференциальная мера эмиссии). При этом форма дифференциальной меры эмиссии может меняться от фазы вспышки [14]. Однако оценки уровня формирования для спектральных полос 304, 1600 и 1700 Å SDO/AIA указывают на то, что уровень формирования излучения вспы-

шек в исследуемых полосах расположен в переходном слое, где с высотой значительно меняется температура и при этом мало изменяется плотность. Таким образом, вкладом изменений дифференциальной меры эмиссии во время фазы спада можно пренебречь. Наблюдательными подтверждениями наших предположений являются результаты, полученные в работах [2, 11, 15] где скорость охлаждения связывалась с энергией вспышки или ее температурой. Поэтому мы можем использовать температурное приближение для создания модели, описывающей спад интенсивности. Мы использовали формулы из работы [8], аналитически описывающие поведение температуры со временем при процессе теплопроводности (1) и процессе потери энергии за счет излучения (2):

$$T_c(t) = T_{c0} \left( 1 + \frac{t}{\tau_{c0}} \right)^{-2/5}, \quad (1)$$

$$T_r(t) = T_{r0} \left( 1 - (1 - \alpha) \frac{t}{\tau_{r0}} \right)^{1/(1-\alpha)}, \quad (2)$$

где  $T_{c0}$  и  $T_{r0}$  — начальные температуры для процессов теплопроводности и потери энергии за счет излучения соответственно,  $\tau_{c0}$  и  $\tau_{r0}$  — времена охладений для тех же процессов соответственно,  $\alpha$  — коэффициент функции радиационных потерь [8].

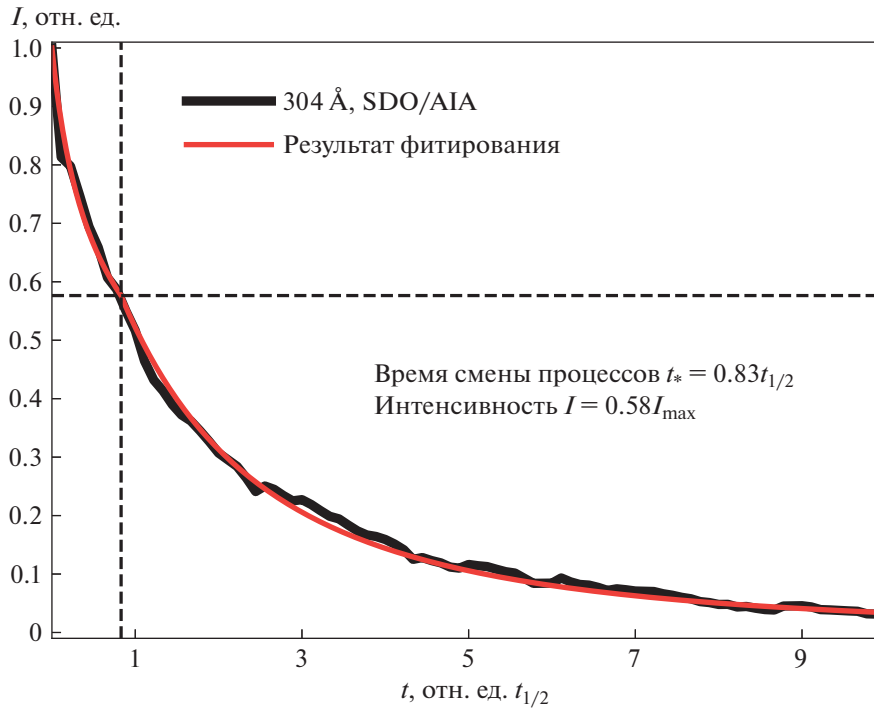
Как уже говорилось выше, согласно используемой модели охлаждения вспышки [8] доминирование процесса потерь за счет излучения не может реализоваться при значимом вкладе механизмов охлаждения за счет теплопроводности. Таким образом, для расчета изменений для фазы с доминированием охлаждения за счет излучения мы можем пренебречь вкладом функции, описывающей изменение температуры за счет теплопроводности. Для фазы доминирования охлаждения за счет теплопроводности мы будем использовать функцию только для этого процесса, как самого быстрого. Таким образом, мы получаем модель, в которой поочередно доминирует один из процессов. Момент времени смены доминирования одного процесса над другим обозначим  $t_*$ . Обычно  $t_*$  является константой, равной моменту, когда температура равна половине максимального значения [6]. В данной модели мы сделаем его переменной величиной, что позволит нам оценить время доминирования процесса теплопроводности. Отметим, что так как мы исключили вклад потерь за счет излучения из первой части фазы, то  $t_*$  будет показывать верхний предел продолжительности доминирования процесса тепло-

проводности. Ниже представлено аналитическое выражение для модифицированной модели  $f(t)$ :

$$f(t) = \begin{cases} \left( 1 + \frac{t}{\tau_{c0}} \right)^{-2/5} & \text{при } t_m \leq t \leq t_*, \\ \left( 1 - \alpha' \frac{t}{\tau_{r0}} \right)^{1/\alpha'} & \text{при } t \geq t_*. \end{cases} \quad (3)$$

Для удобства расчетов было введено обозначение  $\alpha' = (1 - \alpha)$ . Фитирование средних временных профилей проводилось с помощью метода наименьших квадратов. Предполагалось, что для данного значения интенсивности  $I = f(t_*)$  время соответствует моменту перехода. С помощью метода наименьших квадратов находятся параметры  $\alpha'$ ,  $\tau_{r0}$  и  $\tau_{c0}$ , соответствующие наименьшему среднеквадратичному отклонению  $\epsilon$ ;  $\alpha'$ ,  $\tau_{r0}$ ,  $\tau_{c0}$  и  $\epsilon$  сохраняются для дальнейшего анализа. Данная процедура проводилась для всех значений интенсивности в интервале от  $0.05 I_{\max}$  до  $0.99 I_{\max}$  с шагом 0.01. После этого проводится анализ всех  $\epsilon$ , из которых выбирается наименьшее. Параметры, соответствующие этому значению среднеквадратичного отклонения, считаются оптимальными и принимаются за результаты фитирования, включая  $t_*$ .

Использование данной аналитической модели для анализа статистически значимой выборки индивидуальных событий позволяет получить набор параметров, которые смогут характеризовать процессы охлаждения на фазе спада. Однако мы использовали другой подход, основываясь на том, что по представлениям об эволюции вспышки, фаза роста и фаза спада вспышки зависят друг от друга и проходят по одному сценарию независимо от параметров вспышки для “классического” события. Для солнечных вспышек это было показано в статье [16]. Таким образом, для выявления общих закономерностей процессов охлаждения можно использовать усредненный профиль, полученный для выборки событий и нормированный по интенсивности и времени. Экспериментальное обоснование этого подхода было проверено для вспышек на звезде GJ 1243 (M4) в статье [11]. В данной работе было отмечено удивительно точное совпадение индивидуальных профилей “классических” вспышек с результатом фитирования аналитическим приближением, полученным с помощью среднего временного профиля. Для анализа были взяты усредненные профили вспышек для полос 304, 1600, 1700 Å SDO/AIA из работы [10] и усредненный профиль вспышки белого света красного карлика GJ 1243 спектрального класса M4 из работы [11], описанных выше.



**Рис. 1.** Средний временной профиль солнечной вспышки на фазе спада в полосе 304 Å SDO/AIA (черная линия) и результат фитирования (красная линия). По горизонтальной оси отложено время в единицах  $t_{1/2}$ , нормированное на длительность полуширины всего профиля. Интенсивность в единицах, нормированных на максимальное значение.

### 3. АНАЛИЗ И РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 1 представлен результат фитирования функцией модифицированной модели среднего временного профиля солнечной вспышки в полосе 304 Å SDO/AIA. По результатам фитирования момент перехода к доминированию процесса потери энергии за счет излучения равен  $0.83 t_{1/2}$ . Соответственно, интенсивность в момент смены доминирования процессов  $I = 0.58 I_{max}$ . Среднеквадратичное отклонение  $\sigma = 0.01$  говорит о достаточно надежном подборе параметров функции. Полученные значения указывают на более раннее начало доминирования процесса потерь

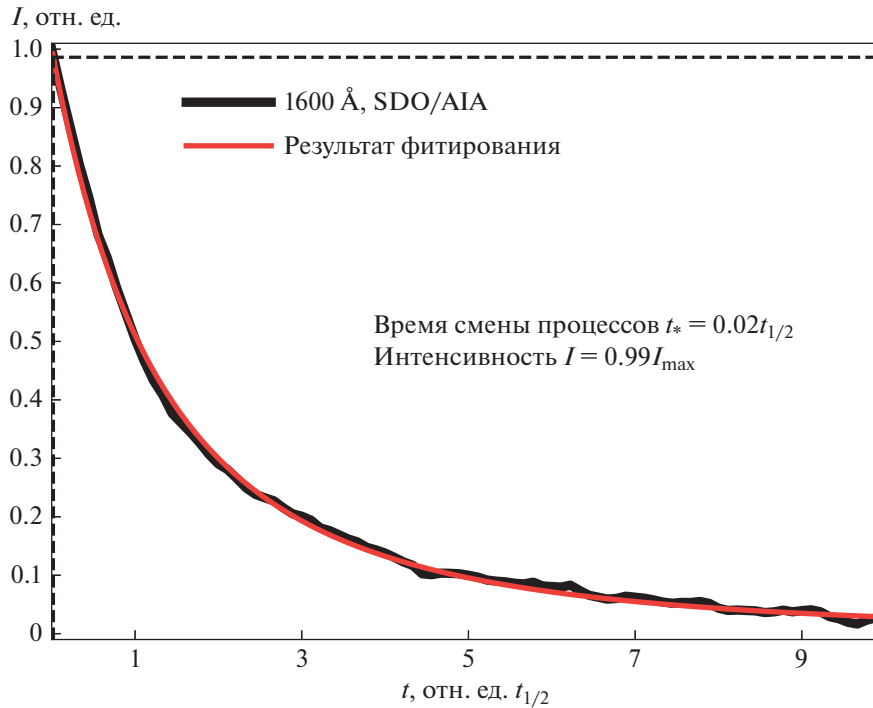
энергии за счет излучения. Параметры модели приведены в табл. 1. В таблице представлены спектральные полосы, для которых проведено фитирование, интенсивность перехода в единицах, нормированных на максимальную интенсивность, время перехода в  $t_{1/2}$ , параметры  $\alpha'$ ,  $\tau_{r0}$  и  $\tau_{c0}$ .

На рис. 2 и 3 приведены результаты фитирования среднего временного профиля солнечной вспышки в полосах 1600 Å и 1700 Å SDO/AIA соответственно. Для обоих спектральных полос время перехода к доминированию процесса охлаждения за счет излучения равно  $0.02 t_{1/2}$ . Учиты-

**Таблица 1.** Параметры аналитической модели для разных спектральных полос

Спектральная полоса	$I, I_{max}$	$t_*, t_{1/2}$	$\alpha$	$\tau_r$	$\tau_c$	$\sigma$
304 Å (SDO/AIA)	0.58	0.83	$1.42 \pm 0.01$	$1.34 \pm 0.01$	$0.28 \pm 0.22$	0.01
1600 Å (SDO/AIA)	0.99	0.02	$1.39 \pm 0.01$	$1.30 \pm 0.01$	$0.56 \pm 0.22$	0.01
1700 Å (SDO/AIA)	0.99	0.02	$1.69 \pm 0.02$	$1.13 \pm 0.02$	$0.58 \pm 0.22$	0.02
Белый свет (Kepler)	0.81	0.26	$1.60 \pm 0.01$	$1.17 \pm 0.01$	$0.38 \pm 0.21$	0.01

Примечание. Приведены: первый столбец — спектральная полоса; далее,  $I$  — интенсивность, нормированная на максимум;  $t_*$  — время смены доминирования процессов, нормированное на полуширину временного профиля вспышки;  $\alpha$  — коэффициент функции радиационных потерь;  $\tau_r$  — время охлаждения для процесса потери энергии за счет излучения;  $\tau_c$  — время охлаждения для процесса теплопроводности;  $\sigma$  — среднеквадратичное отклонение.



**Рис. 2.** Средний временной профиль солнечной вспышки на фазе спада в полосе 1600 Å SDO/AIA. Обозначения аналогичны тем, что представлены на рис. 1.

вая, что шаг при фитировании составлял  $0.01 t_{1/2}$ , мы можем сделать вывод, что процесс теплопроводности практически не работает для этих спектральных полос. Отметим, что среднеквадратичное отклонение  $\sigma$  для полосы 1700 Å выше, чем для полосы 1600 Å (0.02 и 0.01 соответственно). Также значительно отличались параметры  $\alpha$  и  $\tau_r$  (см. табл. 1). Это указывает на то, что временной ход интенсивности отличается для этих полос из-за особенностей формирования излучения в каждой полосе, несмотря на доминирование процесса потери энергии за счет излучения в обоих случаях.

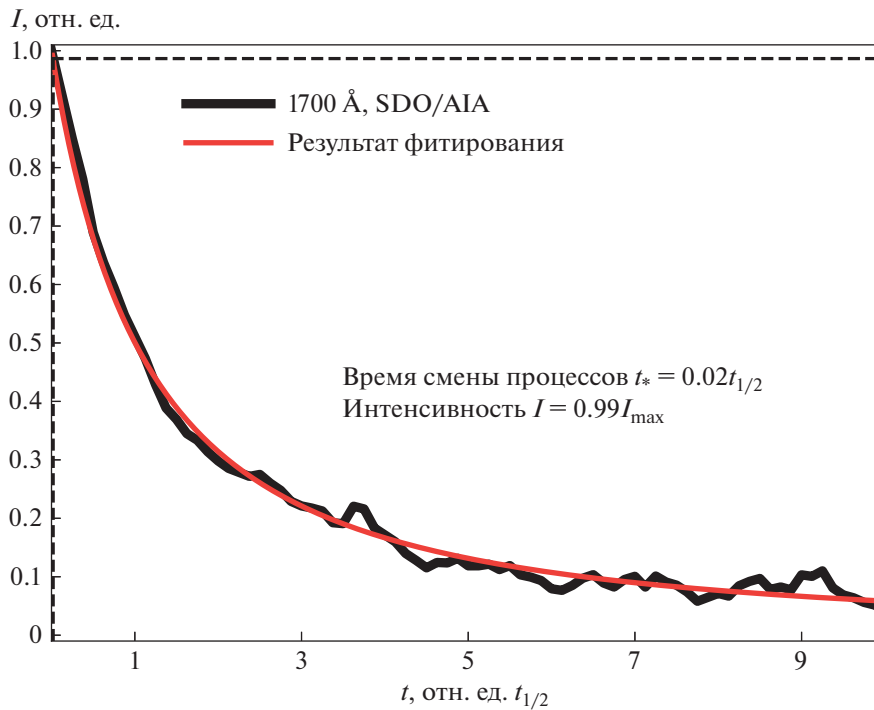
В работах [10, 12] отмечалась схожесть временных профилей звездных вспышек на красных карликах M4 с солнечными. В работе [12] сравнивалось излучение красного карлика и полосы 304 Å, а в работе [10] показано, что параметры предложенной модели для звездной вспышки были ближе к результатам, полученным для полосы 1700 Å. Мы также провели фитирование фазы спада среднего профиля красного карлика M4 из работы [11]. Результаты приведены на рис. 4, а параметры модели – в табл. 1. Отметим, что время перехода к доминированию процесса потерь энергии за счет излучения составляет  $0.26 t_{1/2}$ . Это в четыре раза быстрее, чем заложено в модели, тем не менее этот процесс работает в случае вспы-

шек на звездах этого типа. При этом  $\alpha$  и  $\tau_r$  близки к полученным для 1700 Å.

#### 4. ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Мы провели исследование продолжительности доминирования различных процессов охлаждения/потери энергии на фазе спада солнечной вспышки в нижних слоях атмосферы. Для анализа были использованы средние профили солнечной вспышки в спектральных полосах 304, 1600 и 1700 Å SDO/AIA из работы [10]. Предложенная для исследования модель основана на аналитических выражениях для процессов охлаждения за счет теплопроводности и потерь за излучение из работы [8]. Используя результаты работы [13], было сделано предположение, что в максимуме излучения как звездных, так и солнечных вспышек можно описать функцией черного тела.

Для спектральной полосы 304 Å было получено, что переход к доминированию более медленного процесса потери энергии за счет излучения произошел раньше (рис. 1), чем это предполагается и используется при моделировании в работе [6]. Отметим, что используемая модель не учитывает изменение меры эмиссии, которая также является параметром функции, описывающей интенсивность излучения (см., напр., [17]). В работе [10] проведено сравнение теоретического временного профиля из работы [12] и среднего вре-



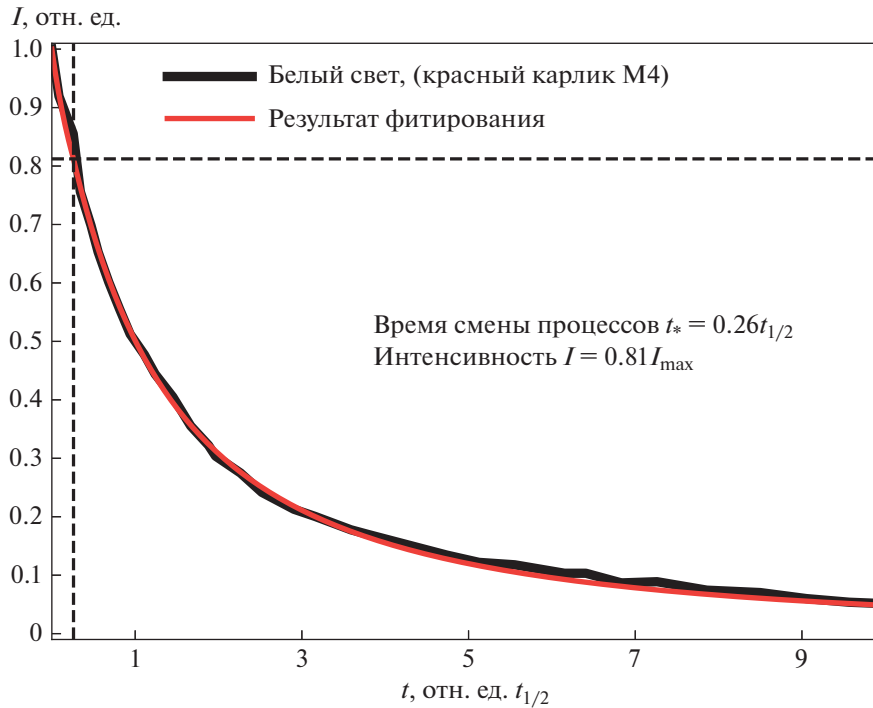
**Рис. 3.** Средний временной профиль солнечной вспышки на фазе спада в полосе 1700 Å SDO/AIA. Обозначения аналогичны тем, что представлены на рис. 1.

менного профиля солнечной вспышки в полосе 304 Å (см. рис. 1). При расчетах временного профиля в работе [12] учитывалось также хромосферное испарение и дополнительную ионизацию рентгеновским и ультрафиолетовым излучениями. Сравнение показало, что средний временной профиль, полученный из наблюдений, эволюционирует медленнее, чем теоретический. Расхождение становится заметно как раз в момент  $t_{1/2} = 1$ . Это как раз может быть связано с тем, что доминирование процесса охлаждения за счет излучения наступает раньше, чем определено в параметрах модели. Однако, так как наша модель была двухступенчатой и не учитывала вклад потерь энергии за счет излучения на первой фазе, то, возможно, переход к доминированию потерь за счет излучения должен произойти раньше, чем дают наши оценки. Таким образом, фактическое отсутствие периода доминирования, обнаруженное для полос 1600 и 1700 Å SDO/AIA, наиболее вероятно является особенностью излучения в этих спектральных областях.

Возможны несколько причин более быстрого наступления периода доминирования процесса охлаждения за счет излучения. Одна из них — более высокая плотность плазмы в областях формирования излучения, которая может приводить к подавлению процессов теплопроводности. Еще одним фактором, подавляющим теплопровод-

ность, является магнитное поле, поскольку движение частиц квазинейтральной плазмы невозможно поперек магнитных линий. Более сильное магнитное поле со сложной структурой, присутствующее в нижних слоях атмосферы Солнца и звезд, также может препятствовать остыванию за счет теплопроводности. Другой причиной может быть наличие скрытых источников энергии на фазе спада вспышки. Дополнительное энерговыделение может привести к повышению температуры и, как следствие, к подавлению процесса охлаждения за счет теплопроводности.

Отметим, что  $\alpha$  имеет значения больше нуля, что характерно для температуры плазмы ниже  $\log(T) < 5$ . Этот факт согласуется с известными параметрами плазмы, излучающей в выбранных спектральных диапазонах. Значение параметра  $\alpha$  больше единицы, в то время как для короны  $\alpha = -0.5$ , что может быть связано с особенностями формирования излучения в нижних слоях солнечной атмосферы. Это вряд ли связано с тем, что излучения полос 1600 и 1700 Å SDO/AIA формируются за счет вклада большого числа линий [18], так как в полосе 304 Å параметр также больше единицы. Также близкие значения показывают  $\tau_r$ , т.е. те параметры модели, которые связаны с потерями за счет излучения. В то же время параметр  $\tau_c$ , связанный с теплопроводностью, показывает распределение, связанное с излучением



**Рис. 4.** Средний временной профиль вспышки на карлике М4 по данным [11] на фазе спада в белом свете (Kepler). Обозначения аналогичны тем, что представлены на рис. 1.

полос в спокойной атмосфере, когда спектральной полосой с самой высокой температурой является  $304 \text{ \AA}$ , ниже располагаются  $1600$  и  $1700 \text{ \AA}$ . Параметр  $\tau_c$  для звезды-карлика класса М4 занимает промежуточное положение между полосой  $304 \text{ \AA}$ , которая традиционно ассоциируется со средней и верхней хромосферой для спокойного Солнца, и полосами  $1600$  и  $1700 \text{ \AA}$ , обычно связанных с нижней хромосферой и областью температурного минимума. Этот факт согласуется с представлениями о структуре атмосферы красных карликов класса М4 [12].

Полученные нами результаты не отвечают на вопрос о том, в чем причина такого соотношения доминирования процессов на фазе спада, а лишь констатируют этот факт на примере средних временных профилей солнечной вспышки в трех спектральных полосах и временного профиля звездной вспышки карлика М4. Но они могут быть использованы для продолжения исследования этих процессов с использованием моделирования. Отметим также, что аналитические модели с высокой точностью описывают средние временные профили солнечной вспышки в исследованных полосах. Эти модели могут быть использованы при анализе наблюдений отдельных событий для выявления особенностей, связанных или с наличием осцилляций на временном профиле, или дополнительных источников излучения.

В результате проведенного исследования нами получены следующие результаты:

- Анализ средних временных профилей солнечной вспышки в спектральной полосе  $304 \text{ \AA}$  SDO/AIA выявил, что в рамках предложенной модели переход от доминирования потерь энергии за счет теплопроводности к доминированию потерь за счет излучения происходит раньше, чем предсказывает классическая модель охлаждения вспышечной плазмы.
- Анализ средних временных профилей солнечной вспышки в спектральных полосах  $1600$  и  $1700 \text{ \AA}$  SDO/AIA выявил практически полное отсутствие фазы доминирования потерь энергии за счет теплопроводности.
- Сравнение параметров модели, полученных для фазы спада солнечных вспышек в разных спектральных полосах, и излучения красного карлика класса М4 в белом свете указывает на то, что процессы охлаждения в солнечных и звездных вспышках схожи и зависят от структуры атмосферы (распределения температуры и плотности с высотой).
- Предложены аналитические модели, которые могут быть использованы для выявления излучения, связанного с дополнительными процессами энерговыделения на фазе спада как в солнечных вспышках (полосы  $1600$ ,  $1700$  и  $304 \text{ \AA}$

SDO/AIA), так и вспышках на звездах, близких к красному карлику класса M4.

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *A. O. Benz*, *Liv. Rev. Solar Physics* **14**, 2 (2017).
2. *R. E. Gershberg and N. I. Shakhovskaya*, *Nature Phys. Sci.* **242**, 85 (1973).
3. *H. S. Hudson*, *Space Sci. Rev.* **158**, 5 (2011).
4. *Y. W. Jiang, S. Liu, W. Liu, and V. Petrosian*, *Astrophys. J.* **638**, 1140 (2006).
5. *I. V. Zimovets, J. A. McLaughlin, A. K. Srivastava, D. Y. Kolotkov, et al.*, *Space Sci. Rev.* **217**, 66 (2021).
6. *M. J. Aschwanden and D. Tsiklauri*, *Astrophys. J. Suppl.* **185**, 171 (2009).
7. *S. Serio, F. Reale, J. Jakimiec, B. Sylwester, and J. Sylwester*, *Astron. and Astrophys.* **241**, 197 (1991).
8. *P. J. Cargill, J. T. Mariska, and S. K. Antiochos*, *Astrophys. J.* **439**, 1034 (1995).
9. *D. F. Ryan, P. C. Chamberlin, R. O. Milligan, and P. T. Gallagher*, *Astrophys. J.* **778**, 68, (2013).
10. *L. K. Kashapova, A.-M. Broomhall, A. I. Larionova, E. G. Kupriyanova, and I. D. Motyk*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **502**, 3922 (2021).
11. *J. R. A. Davenport, S. L. Hawley, L. Hebb, J. P. Wisniewski, et al.*, *Astrophys. J.* **797**, id. 122 (2014).
12. *J. C. Allred, S. L. Hawley, W. P. Abbett, and M. Carlsson*, *Astrophys. J.* **644**, 484 (2006).
13. *M. N. Lovkaya*, *Astron. Rep.* **57**, 603 (2013).
14. *S. V. Shestov, S. V. Kuzin, A. M. Urnov, A. S. Ul'yanov, and S. A. Bogachev*, *Astron. Letters* **36**, 44 (2010).
15. *A. D. Andrews*, *Irish Astron. J.* **7**, 20 (1965).
16. *J. Jakimiec, B. Sylwester, J. Sylwester, S. Serio, G. Peres, and F. Reale*, *Astron. and Astrophys.* **253**, 269 (1992).
17. *B. O'Dwyer, G. Del Zanna, H. E. Mason, M. A. Weber, and D. Tripathi*, *Astron. and Astrophys.* **521**, id. A21 (2010).
18. *P. J. A. Simões, H. A. S. Reid, R. O. Milligan, and L. Fletcher*, *Astrophys. J.* **870**, id. 114 (2019).