

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В.ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Малютин Виктор Александрович

**Оптическое излучение солнечной хромосферы во время
вспышек**

Специальность 1.3.1. Физика космоса, астрономия

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2026

Работа выполнена на кафедре астрофизики и звездной астрономии Физического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова

Научный руководитель: **Бычков Константин Вениаминович**
доктор физико-математических наук

Официальные оппоненты: **Абраменко Валентина Изосимовна**
доктор физико-математических наук,
Крымская астрофизическая обсерватория
Российской академии наук,
отдел физики Солнца и Солнечной системы,
заведующий отделом

Богачев Сергей Александрович
доктор физико-математических наук,
профессор РАН,
Институт космических исследований
Российской академии наук,
отдел физики космической плазмы,
главный научный сотрудник

Ламзин Сергей Анатольевич
доктор физико-математических наук,
старший научный сотрудник (ученое звание),
Государственный астрономический институт имени
П. К. Штернберга МГУ имени М.В.Ломоносова,
лаборатория новых фотометрических методов,
ведущий научный сотрудник

Защита диссертации состоится 14 мая 2026 г. в 14 часов 00 минут на заседании диссертационного совета МГУ.013.1 Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова по адресу: 119234, г. Москва, Университетский проспект, дом 13, конференц-зал.

E-mail: dissovet@sai.msu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В.Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на портале:

<https://dissovet.msu.ru/dissertation/3858>

Автореферат разослан 13 апреля 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета МГУ.013.1,
доктор физико-математических наук

А. И. Богомазов

Общая характеристика работы

Актуальность темы

Регистрируемое от Солнца излучение приходит к наблюдателю от широкого диапазона высот, начиная от внешних слоев (корона) и заканчивая фотосферой, в этих слоях описание излучения требует разных подходов и допускает некоторые упрощения. Так, большая плотность фотосферного газа позволяет применить методы термодинамики (приближение локального термодинамического равновесия — ЛТР). Напротив, разреженное вещество короны позволяет использовать т. н. корональное приближение, которое также применяется для межзвездной среды.

Условия формирования излучения в хромосфере отличаются от таковых в фотосфере и в короне. В хромосфере реализуется значительно большее число дискретных уровней у атомных систем, чем в более плотной фотосфере, причем именно высоковозбужденные состояния определяют состояние ионизации газа. При переходе от низколежащих к более возбужденным дискретным состояниям скорость ударной ионизации быстро растет по мере увеличения главного квантового числа n . Поэтому для уверенной оценки состояния ионизации газа необходимо учитывать достаточно большое число возбужденных уровней. Верхняя граница n_{\max} получается из условия достижения детального баланса ударной ионизации с тройной рекомбинацией, в реальных условиях хромосферы она лежит в диапазоне $n_{\max} \leq 18$ [1]. Также при формировании излучения в условиях хромосферы оно испытывает самопоглощение в линиях, то есть газ является оптически толстым в частотах линий, оставаясь при этом прозрачным в континууме. Это обстоятельство, с одной стороны, усложняет теоретический анализ излучения объекта, а с другой — позволяет более уверенно восстановить физические условия в излучающем газе по сравнению со случаем прозрачного газа: его температуру, плотность, степень ионизации и возможную пространственную неоднородность.

В предлагаемой работе рассмотрены аспекты излучения газа в спектральных линиях оптического диапазона; основное внимание уделяется восстановлению (определению) параметров газа во время вспышек применительно к условиям солнечной хромосферы. Рассматривается разделение газа на совокупность слоев, ориентированных поперек луча зрения, которое впервые было рассмотрено в статье Э.А. Барановского [2]. В пределах одного слоя плотность и температура газа считаются постоянными. Восстановление газа потребовало привлечь от одного до четырех слоев в разных вспышках.

Распространенным типом объектов солнечной атмосферы, в том числе возможным атрибутом вспышек, являются протуберанцы. По излучению фрагмента эруптивного протуберанца в ходе вспышки 07 июня 2011

года также восстановлены параметры его газового сгустка. Данный сгусток газа наблюдался через несколько часов после максимума вспышки на фазе затухания.

Во время вспышек в хромосфере образуются яркие области с линейным размером от сотен до десятков тысяч километров. В оптическом диапазоне их спектра присутствуют эмиссионные линии атомов водорода (бальмеровская серия), резонансные линии иона кальция (H и K CaII) и его инфракрасный триплет ($\lambda = 8498\text{\AA}$, 8542\AA , 8662\AA), линии D3 и $\lambda = 10830\text{\AA}$ атома гелия, линия $\lambda = 4686\text{\AA}$ иона HeII, магниевый триплет ($\lambda = 5183\text{\AA}$, 5172\AA , 5167\AA), линии нейтрального и ионизованного железа (FeII) и атома алюминия [3]. Сочетание линий низкого и высокого возбуждения, а также линий с малой и большой оптической толщиной при анализе наблюдений позволяет надежно выявить стратификацию излучающего газа. Как правило, восстановление параметров оптических источников солнечной вспышки выполняется по малому числу линий. Так, в работе Мустеля и Северного [4] определение физических параметров газа в хромосферной вспышке 5 августа 1949 г. осуществлено по наблюдениям четырех членов бальмеровской серии водорода. В [5] проводится анализ излучения вспышки 10 сентября 2017 г. по двум линиям: $H\beta$ и IR CaII ($\lambda = 8542\text{\AA}$); во вспышке 29 марта 2014 г. в работе [6] — также по двум линиям: $H\alpha$ и IR CaII ($\lambda = 8542\text{\AA}$); в уже упоминавшейся работе [2] — по пяти спектральным линиям водорода и иона кальция: по четырем первым членам бальмеровской серии и резонансной линии K CaII. В данной диссертационной работе проводится определение физических параметров оптических источников в солнечных вспышках по шести спектральным линиям нескольких химических элементов. Наблюдения пяти солнечных вспышек в спектральных линиях атома водорода, иона CaII и линии D3 атома гелия проведены сотрудником ГАИШ МГУ Юрием Алексеевичем Купряковым [7].

Для вычисления потоков в спектральных линиях требуется решать уравнения баланса с учетом основных элементарных процессов заселения и опустошения дискретных уровней: связанно-связанных, связанно-свободных и свободно-связанных радиационных и ударных. Такой подход получил название не-ЛТР приближение. Учет многих элементарных процессов связан со сбором атомных данных: в рассматриваемой работе применяются модели трех атомных систем — атомов водорода и гелия, а также иона CaII.

Цели диссертационной работы

Целью диссертационной работы является восстановление физических параметров вспышечных источников оптического излучения в стационарном приближении. Для ее реализации ставятся следующие задачи:

- Составить модели атомов водорода, гелия и иона кальция CaII с учетом высоковозбужденных уровней для уверенного определения состояния ионизации в условиях хромосферного газа.
- Создать алгоритм, позволяющий с учетом непрозрачности газа в спектральных линиях вычислять теоретические потоки в линиях трех атомных систем: H I, He I, Ca II.
- С использованием данного алгоритма определить параметры излучающего газа для реальных оптических наблюдений солнечных вспышек: 07 июня 2011 г. (а именно фрагмента эруптивного протуберанца), 21 апреля 2017 г., 01 октября 2015 г., 27 апреля и 11 мая 2012 г. Среди восстанавливаемых параметров: концентрация газа, его температура, пространственная структура, микротурбулентная скорость.

Объект и предмет исследования

Объектом исследования являются источники оптического излучения солнечных вспышек, а также фрагменты эруптивного протуберанца. Предметом исследования являются оптические спектры данных источников и фрагментов протуберанца.

Методология исследования

Составленный автором алгоритм реализован средствами языка фортран. Решается прямая задача по вычислению теоретических потоков в спектральных линиях с учетом самопоглощения в модели совокупности нагретых слоев газа, которые затем сравниваются с потоками сразу во всех наблюдаемых линиях.

Научная новизна

- Впервые выполнено восстановление физических параметров вспышечного газа для хромосферных условий в солнечной вспышке 21 апреля 2017 г. с учетом излучения в трех линиях бальмеровской серии водорода.
- Впервые выполнено восстановление физических параметров вспышечного газа для хромосферных условий в солнечных вспышках 01 октября 2015 г., 27 апреля 2012 г., 11 мая 2012 г. одновременно с учетом излучения в трех линиях бальмеровской серии водорода, линиях H и IR ($\lambda = 8542 \text{ \AA}$) иона CaII, а также линии D3 атома гелия.

Теоретическая и практическая значимость

Восстановленные параметры газа по оптическим линиям в ходе пяти вспышек позволяют дополнить представление о структуре и состоянии солнечной атмосферы, полученное из наблюдений в рентгеновском, радио- и других диапазонах спектра другими исследователями. Также восстановленные параметры излучающего газа позволяют наложить ограничение на возможные механизмы нагрева газа в ходе этих вспышек. Реализованный алгоритм может дать сведения о теоретических потоках в других спектральных линиях атомов водорода, гелия и иона кальция, а также служить при анализе вспышечных событий при наличии дополнительного набора наблюдаемых оптических линий указанных атомных систем. Анализ наблюдений оптических источников вспышки дает возможность для более глубокого изучения связи между проявлением солнечных вспышек в верхней атмосфере и их откликом в нижней и средней хромосфере.

Положения, выносимые на защиту

1. Разработанная методика расчета теоретических потоков в линиях H γ , HeI и CaII, которая основана на решении уравнений статистического равновесия и на использовании приближения вероятности выхода кванта из среды, позволяет определить физические параметры излучающего газа в солнечных вспышках 07 июня 2011 г., 21 апреля 2017 г., 01 октября 2015 г., 27 апреля и 11 мая 2012 г.
2. Введение в многослойную модель солнечной вспышки слоев как с низкой температурой ($\sim 4000 \div 8000$ К) и концентрацией частиц порядка 10^{13} см^{-3} , так и с температурой более 10000 К, но концентрацией частиц не более 10^{12} см^{-3} позволяет воспроизвести наблюдаемые потоки в линиях H γ , CaII и HeI во время солнечных вспышек 21 апреля 2017 г., 01 октября 2015 г., 27 апреля и 11 мая 2012 г.
3. Потоки в линиях H α , H β и H CaII, наблюдавшиеся от фрагмента протуберанца во вспышке 07 июня 2011 г., могут быть интерпретированы в модели однородного газового слоя с концентрацией в диапазоне $(2.8 \div 5.3) \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$ и температурой в диапазоне $6300 \div 10000$ К.

Личный вклад автора

Результаты диссертационной работы опубликованы в 5 статьях в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности 1.3.1. Физика космоса, астрономия.

В статье 1 (личный вклад 40%) автор выполнил определение газовых параметров для двух из четырех эпизодов вспышки 27 апреля 2012 года. В статье 2 (личный вклад 50%) выполнил определение физических параметров фрагмента протуберанца по трем линиям для одного момента времени во вспышке 07 июня 2011 года. В статье 3 (личный вклад 85%) выполнил восстановление физических параметров двух отдельных оптических источников (ядер) вспышки 01 октября 2015 года для пяти из шести наблюдавшихся эпизодов; также провел сравнение оптической и рентгеновской светимости во вспышке. В статье 4 (личный вклад 60%) выполнил восстановление физических параметров оптического источника вспышки 21 апреля 2017 года для пяти из шести моментов времени; также провел сравнение оптической и рентгеновской светимости во вспышке. В статье 5 (личный вклад 20%) выполнил восстановление для двух из семи эпизодов вспышки 11 мая 2012 года.

Степень достоверности результатов

Алгоритм реализован общедоступными средствами языка фортран. При составлении моделей атомных систем применялись широко используемые научным сообществом базы атомных данных, а также статьи и монографии, прошедшие рецензирование. Восстановление параметров излучающего газа осуществляется по спектральным данным, полученным на наземных приборах, которые активно используются научным сообществом. Результаты исследований автора опубликованы в рецензируемых журналах и представлены на всероссийских конференциях.

Апробация работы

1. Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов-2022». Секция «Физика». МГУ им. М.В. Ломоносова. Москва, Россия. 11-22 апреля 2022 г. Устный доклад.
2. Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов-2023». Секция «Физика». МГУ им. М.В. Ломоносова. Москва, Россия. 10-21 апреля 2023 г. Устный доклад.
3. Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов-2024». Секция «Физика». МГУ им. М.В. Ломоносова. Москва, Россия. 12-26 апреля 2024 г. Устный доклад.
4. Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов-2025». Секция «Физика». МГУ им.

- М.В. Ломоносова. Москва, Россия. 11-25 апреля 2025 г. Устный доклад.
5. Всероссийская конференция «Магнетизм и активность Солнца - 2022». Крымская астрофизическая обсерватория, п. Научный, Россия. 22-26 августа 2022 г. Устный доклад.
 6. Всероссийская конференция «Магнетизм и активность Солнца - 2024». Крымская астрофизическая обсерватория, п. Научный, Россия. 01-05 июля 2024 г. Устный доклад.
 7. Всероссийская конференция «Магнетизм и активность Солнца - 2025». Крымская астрофизическая обсерватория, п. Научный, Россия. 30 июня-04 июля 2025 г. Устный доклад.
 8. Девятнадцатая ежегодная конференция «Физика плазмы в солнечной системе -2024» ИКИ РАН. Москва, Россия. 05-09 февраля 2024 г. Устный доклад.
 9. Двадцатая ежегодная конференция «Физика плазмы в солнечной системе - 2025» ИКИ РАН. Москва, Россия. 10-14 февраля 2025 г. Устный доклад.
 10. Всероссийская научная конференция «Современная астрономия: наука и образование (к 270-летию Московского Университета)», МГУ имени М.В. Ломоносова, Россия, 23-27 июня 2025 г. Устный доклад.
 11. Всероссийская конференция с международным участием «Физика звезд в эпоху многоволновых наблюдений», Санкт-Петербургский государственный университет. С.-Петербург, Россия. 22-26 сентября 2025 г. Устный доклад.

Объем и структура работы

Диссертация состоит из введения, трех глав и заключения. Полный объем диссертации составляет 111 страниц, включая 29 рисунков и 14 таблиц. Список литературы содержит 128 наименований.

Основное содержание работы

Во **Введении** обосновывается актуальность темы диссертационной работы. Описаны цели и задачи исследования, дается характеристика научной новизны работы, а также научной и практической значимости полученных результатов. Формулируются основные положения, выносимые на защиту. Указан личный вклад автора, приведен список опубликованных статей, а также конференций, на которых были представлены эти результаты. Изложена структура работы, а также краткое содержание диссертации.

В **главе 1** содержатся общие сведения о солнечной атмосфере и вспышках, среди них:

- описание формирования излучения в разных слоях атмосферы (фотосфера, корона), отмечается особенность его формирования в хромосферном газе (а именно необходимость учета высоковозбужденных дискретных состояний для оценки состояния ионизации);
- полуэмпирические модели атмосферы, а также используемые в них модели атомов водорода, гелия, иона кальция CaII;
- протуберанцы и волокна — их физические характеристики, классификация, наблюдательные проявления, особенно в оптическом диапазоне;
- краткие сведения о солнечных вспышках, отдельное внимание уделено источникам энергии во вспышке;
- моделирование излучения и процессов, протекающих в ходе солнечной вспышки, с помощью пакетов программ;
- моделирование излучения от протуберанцев, а также используемые при расчетах модели атомных систем.

В **главе 2** приводится методика для вычисления интегральных потоков в спектральных линиях: перечисляются учитываемые элементарные процессы заселения и опустошения дискретных уровней, описан учет рассеяния излучения в частотах линий с помощью приближения вероятности выхода кванта [8–10], описан способ решения системы уравнений баланса с учетом физических условий в хромосфере.

Считается, что хромосферный газ находится в поле фотосферного излучения, которое принято чернотельным. Профиль поглощения при радиационных переходах атома водорода и высоковозбужденных переходах иона CaII принимается сверткой контуров Доплера и Хольцмарка, а при переходах между уровнями атома гелия и низкими уровнями иона CaII — контуром Фойгта. Основным донором электронов считается водород. Описываются используемые в диссертации атомные данные атомов водорода, гелия и иона CaII.

В **главе 3** осуществляется восстановление параметров излучающего газа на базе разработанной в предыдущей главе методики применительно к пяти солнечным вспышкам. Критерием восстановления является близость наблюдаемых и теоретических потоков одновременно во всех зарегистрированных линиях. Показано, что фрагмент протуберанца, наблюдавшийся в ходе вспышки 07 июня 2011 г. в линиях $H\alpha$, $H\beta$ водорода и H CaII, является однородным слоем газа с низкой температурой ($\approx 6300 \div 10000$ К), столбцовой плотностью $(1.9 \div 3.7) \cdot 10^{19}$ см⁻² и объемной плотностью $\sim 5 \cdot 10^{10}$ см⁻³. Полученные значения близки к тем, что приводятся в литературе на базе ультрафиолетовых и оптических наблюдений. Газ, параметры которого восстановлены во вспышке 21 апреля 2017 г. по линиям $H\alpha$, $H\beta$, $H\epsilon$ бальмеровской серии водорода, оказывается неоднородным по лучу зрения: в ходе

вспышки присутствует плотный ($N > 10^{13} \text{ см}^{-3}$) холодный ($T \approx 4000 \text{ К}$) слой и разреженный ($N < 10^{11} \text{ см}^{-3}$), но более нагретый ($T > 5700 \text{ К}$), причем разреженный слой расположен ближе к наблюдателю. Отмечается, что в один из шести моментов времени потоки в трех бальмеровских линиях могут быть объяснены в приближении однородного газового слоя; однако по совокупности с другими данными отдается предпочтение двухслойной модели оптического источника. Во вспышке 01 октября 2015 г. восстановлены параметры газа в двух оптических источниках (ядрах), расположенных поблизости, оба из которых были зарегистрированы в линиях $H\alpha$, $H\beta$, $H\epsilon$ водорода, линиях H и IR (8542Å) иона CaII, а также в линии D3 атома гелия. Излучающий газ является существенно неоднородным по лучу зрения, имея от двух до четырех слоев. В каждом эпизоде вспышки есть слои от высокой (12000 ÷ 18000К) до низкой (4500 ÷ 5500К) температуры и с концентрацией от 10^{11} см^{-3} до 10^{13} см^{-3} . Вспышки 27 апреля и 11 мая 2012 г., также наблюдавшиеся в шести указанных линиях, показывают неоднородность как по лучу зрения, так и в картинной плоскости. Исходя из равенства наблюдаемых и теоретических *относительных* потоков, а также заниженных теоретических *абсолютных* потоков по сравнению с наблюдаемыми, предложена модель неоднородных излучающих облаков, не накладывающихся по лучу зрения. Размер облака составляет около 100 км при вкладе отдельных облаков в полный поток излучения порядка 10%. Данные облака имеют по крайней мере две области — холодную с температурой в диапазоне 7800 К ÷ 9000 К и горячую, 13800 К ÷ 19500 К. Также для всех вспышек (исключая событие 07 июня 2011 г.) приводится сравнение рентгеновской и оптической вспышечной светимости Солнца в исследуемых линиях. Рентгеновская светимость в исследуемых вспышках оказывается не больше оптической, поэтому рентгеновское излучение не может являться основным источником оптического свечения указанных вспышек. В конце главы приводятся значения температуры и электронной концентрации, восстановленные в литературе по наблюдениям солнечных вспышек в двух-трех оптических линиях.

В Заключении отмечается, что восстановление температуры, концентрации и пространственной структуры излучающего вспышечного газа на Солнце в рамках разработанной методики является продуктивным в случае среды, оптически толстой в спектральных линиях. Созданный алгоритм, который позволяет вычислять теоретические потоки в спектральных линиях атомов водорода, гелия и иона CaII, учитывает достаточно высоковозбужденных уровней для достижения термализации. При объяснении потоков в спектральных линиях во вспышках 07 июня 2011 г., 21 апреля 2017 г., 01 октября 2015 г., 27 апреля и 11 мая 2012 г. требуется рассмотреть модели газа с числом однородных слоев от одного до четырех, каждый из которых обладает своими индивидуальными параметрами.

Публикации по теме диссертации

Статьи в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в базе ядра РИНЦ «eLibrary Science Index» и рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности и отрасли наук:

1. Купряков, Ю.А., Бычков, К.В., Белова, О.М., **Малютин, В.А.**, Горшков, А.Б. Моделирование излучения вспышки 27.04.2012 в спектральных линиях водорода, гелия и кальция // Вестник Московского университета. Серия 3. Физика. Астрономия. — 2024. — Т. 79, № 2. — 2420801. EDN: LNRTUC. Импакт-фактор 0.169 (РИНЦ). Личный вклад 40%. Объем 0.96 печатных листов.
Kupryakov, Yu.A., Bychkov, K.V., Belova, O.M., **Maliutin, V.A.**, Gorshkov, A.B. Simulation of the April 27, 2012 flare emission in the spectral lines of Hydrogen, Helium, and Calcium // Moscow University Physics Bulletin. — 2024. — Vol. 79, no. 2. — P. 275–282. EDN: YWJDOS. Импакт-фактор 0.11 (JCI). Личный вклад 40%. Объем 0.96 печатных листов.
2. Купряков, Ю.А., Бычков, К.В., **Малютин, В.А.**, Горшков, А.Б., Белова, О.М. Вспышка 7 июня 2011 года и анализ фрагментов эруптивного протуберанца // Астрономический журнал. — 2024. — Т. 101, № 11. — С. 1003–1009. EDN: JKYUAC. Импакт-фактор 0.477 (РИНЦ). Личный вклад 50%. Объем 0.84 печатных листов.
Kupryakov, Yu.A., Bychkov, K.V., **Malyutin, V.A.**, Gorshkov, A.B., Belova, O.M. Flare June 7, 2011, and analysis of eruptive prominence fragments // Astronomy reports. — 2024. — Vol. 68, no. 11. — P. 1091–1097. EDN: NCZJWR. Импакт-фактор 0.19 (JCI). Личный вклад 50%. Объем 0.84 печатных листов.
3. **Малютин, В.А.**, Купряков, Ю.А., Бычков, К.В., Горшков, А.Б., Белова, О.М. Восстановление параметров газа, излучающего в спектральных линиях оптического диапазона водорода, гелия и кальция, во время вспышки SOL2015-10-01 // Вестник Московского университета. Серия 3. Физика. Астрономия. — 2025. — Т. 80, № 1. — 2510801. EDN: AETZYI. Импакт-фактор 0.169 (РИНЦ). Личный вклад 85%. Объем 0.84 печатных листов.
Maliutin, V.A., Kupryakov, Yu.A., Bychkov, K.V., Gorshkov, A.B., Belova, O.M. Theoretical reconstruction of the parameters of gas emitting in the spectral lines of the optical range of Hydrogen, Helium, and Calcium during the SOL2015-10-01 flare // Moscow University Physics Bulletin. — 2025. — Vol. 80, no. 1. — P. 152–159. EDN: POSTUB. Импакт-фактор 0.11 (JCI). Личный вклад 85%. Объем 0.96 печатных листов.
4. Купряков, Ю.А., **Малютин, В.А.**, Бычков, К.В., Горшков, А.Б., Белова, О.М. Вспышка 2017-04-21: анализ излучения в линиях

бальмеровской серии водорода // Вестник Московского университета. Серия 3. Физика. Астрономия. — 2025. — Т. 80, № 3. — 2530801. EDN: HCWAKY. Импакт-фактор 0.169 (РИНЦ). Личный вклад 60%. Объем 0.72 печатных листов.

Kupryakov, Yu.A., **Maliutin, V.A.**, Vychkov, K.V., Gorshkov, A.B., Belova, O.M. Analysis of Balmer series emission in the solar flare SOL2017-04-21 // Moscow University Physics Bulletin. — 2025. — Vol. 80, no. 3. — P. 613–618. EDN: FXNWTE. Импакт-фактор 0.11 (JCI). Личный вклад 60%. Объем 0.72 печатных листов.

5. Купряков, Ю.А., Бычков, К.В., Белова, О.М., Горшков, А.Б., **Малютин, В.А.** Наблюдение, теоретический расчет и анализ солнечной вспышки 11 мая 2012 г. // Геомагнетизм и аэрономия. — 2025. — Т. 65, № 3. — С. 307–313. EDN: ERKZKH. Импакт-фактор 0.727 (РИНЦ). Личный вклад 20%. Объем 0.84 печатных листов. (Импакт-фактор 0.19 (JCI) для переводной версии).

Список литературы

1. Белова О.М., Бычков К.В. Ионизация из возбужденных состояний как причина нестационарной населенности уровней водорода за фронтом ударной волны. // *Астрофизика* — 2017. — Том 60, вып. 2. — С. 219–232.
2. Барановский Э.А. К вопросу о слоистой структуре солнечных вспышек. // *Изв. Крым. астрофиз. обс.* — 1986. — Том 75. — С. 3–8.
3. Fletcher L., Dennis B.R., Hudson H.S. et al. An observational overview of solar flares. // *Space Sci Rev.* — 2011. — Vol. 159. — Pp. 19–106.
4. Мустель Э.Р., Северный А.Б. Исследование спектров большой хромосферной вспышки на Солнце 5 августа 1949 г. // *Изв. Крым. астрофиз. обс.* — 1952. — Том 8. — С. 19–50.
5. D. Kuridze, M. Mathioudakis, P. Heinzel et al. Spectral characteristics and formation height of off-limb flare ribbons. // *Astrophys. J.* — 2020. — June. — Vol. 896, no. 2. — Pp. 120–133.
6. F. Rubio da Costa, L. Kleint, V. Petrosian et al. Data-driven radiative hydrodynamic modeling of the 2014 March 29 X1.0 Solar flare. // *Astrophys. J.* — 2016. — August. — Vol. 827, no. 1. — Pp. 38–51.

7. *Kotrč P., Kononovich E.V., Kupryakov Yu.A.* Solar spectral observations at the Ondřejov observatory with Moscow State University cooperation. *Astron. Astrophys. Transactions* — 2007. — Vol. 26, iss. 4-5. — Pp. 267–273.
8. *Биберман Л.М.* К теории диффузии резонансного излучения. // *ЖЭТФ*. — 1947. — Т. 17. — С. 416–426.
9. *Holstein T.* Imprisonment of resonance radiation in gases. // *Phys. Rev.* — 1947. — Vol. 72. — Pp. 1212–1233.
10. *Holstein T.* Imprisonment of resonance radiation in gases. II // *Phys. Rev.* — 1951. — Vol. 83. — Pp. 1159–1168.