

ОТЗЫВ официального оппонента

на диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук Малютина Виктора Александровича на тему «Оптическое излучение солнечной хромосферы во время вспышек» по специальности 1.3.1. Физика космоса, астрономия

1. Актуальность темы исследования. Диссертация В.А. Малютина посвящена актуальной проблеме физики Солнца – диагностике хромосферной плазмы, то есть определению её температуры, плотности и иных характеристик, для солнечных вспышек и протуберанцев по их излучению в спектральных линиях водорода, гелия и иона кальция CaII в оптической области солнечного спектра. Хромосфера Солнца, как верхний плотный слой солнечной атмосферы, представляет собой основную «мишень» для формирующихся во вспышках потоках частиц и излучения, активно откликается на это воздействие, показывает сложную, часто трудно понятную динамику. Задача восстановления первичных характеристик вспышек по этим сложным вторичным проявлениям является одной из основных в физике Солнца. При этом, если в области высоких многомиллионных температур, где доминирует непрерывное рентгеновское излучение, возможны относительно простые модели, то для корректного описания хромосферных линий требуется построение сложных многоуровневых моделей основных атомов и ионов с аккуратным учетом большого числа факторов, влияющих на населенность уровней, включая механизмы возбуждения, деактивации, ионизации и рекомбинации атомов и ионов, механизмы уширения спектральных линий, а также механизмы переноса излучения в плазме. Указанная задача не решена, и не может быть решена в общем виде, что создает условия для появления большого числа моделей, предлагающих разные приближения и подходы к этой общей проблеме. Автором в диссертационной работе предложена оригинальная модель, основной особенностью которой является (1) фиксация трёх

основных элементов: водорода, гелия и кальция и (2) применение многослойного источника излучения, что позволяет значительно улучшить согласие теоретических расчетов с наблюдениями. На примере нескольких событий на Солнце продемонстрирована возможность модели по восстановлению плотности и температуры излучающей плазмы, что обосновывает актуальность проведенного исследования.

2. Структура и содержание работы. Диссертация состоит из введения, трёх глав и заключения. Общий объём – 111 страниц, включая 29 рисунков и 14 таблиц. Список литературы содержит 128 наименований.

Введение к работе обосновывает актуальность исследования, формулирует цели и задачи, научную новизну, а также положения, выносимые на защиту.

Глава 1 содержит обзор исторических и современных представлений о солнечной атмосфере (главным образом о хромосфере), о физике солнечных вспышек и протуберанцев, а также о принятых подходах к моделированию оптического излучения. Продемонстрировано знание автором современного состояния проблемы.

Глава 2 посвящена методике исследования: записано общее уравнение баланса для многоуровневого атома или иона, перечислены и охарактеризованы ключевые элементарные процессы, влияющие на населенность уровней в условиях хромосферы Солнца, а также механизмы уширения спектральных линий. После общего описания модели, изложены особенности конкретных атомных систем атомов водорода, гелия и иона CaII, учитываемые при расчетах. Представлены сведения об источниках атомных данных. Изложение материала демонстрирует высокую квалификацию автора в области спектроскопии, понимание им методов расчёта спектров излучения в условиях отсутствия локального термодинамического равновесия, а также высокий уровень владения соответствующим математическим аппаратом.

Глава 3 содержит результаты применения модели для восстановления параметров плазмы в пяти событиях на Солнце, а именно для эруптивного протуберанца, наблюдавшегося 07.06.2011 г. и четырёх солнечных вспышек (от 21.04.2017, 01.10.2015, 27.04.2012 и 11.05.2012). Выбор событий, насколько можно понять, осуществлялся, исходя из наличия доступа к экспериментальным данным. Показана невозможность для большинства событий согласования теоретических расчетов и наблюдаемых потоков излучения в рамках моно-температурного приближения. Для всех событий предложена модель источника (в большинстве случаев много-температурная), позволяющая объяснить результаты измерений с высокой точностью.

Заключение подводит итоги и формулирует основные результаты.

3. Научная новизна результатов. Научная новизна работы основана на уже упомянутом сочетании параметров модели и принятом подходе к решению уравнений, что в совокупности образует оригинальный метод, адаптированный для практического применения. Конкретным новым результатом является восстановление физических параметров излучающей плазмы для нескольких солнечных событий, в том числе демонстрация возможности одновременного согласования потоков излучения сразу в шести оптических линиях (3 линии водорода, 2 линии иона CaII и линия нейтрального гелия) за счет применения многослойной модели источника излучения.

4. Достоверность и обоснованность выводов. Полученные и изложенные в диссертационном исследовании результаты представляются достоверными, что обеспечивается и подтверждается следующими обстоятельствами:

(1) подробным изложением исходных уравнений и методики расчета в диссертационном исследовании, в виде, допускающем пошаговую проверку метода;

(2) достоверностью полученных в результате расчетов параметров плазмы, которые по порядку величины находятся в соответствии с современными представлениями о температуре, плотности и иных характеристиках источников излучения в хромосфере Солнца;

(3) сравнением и согласованием полученных результатов с расчетами, выполненными для схожих событий иными методами, основанными на иных источниках данных, в частности на космических наблюдениях вспышек в линиях вакуумного УФ диапазона;

(4) апробацией работы на 11 всероссийских и международных конференциях с публикацией основных результатов в 5 статьях в рецензируемых журналах, рекомендованных диссертационным советом МГУ.

5. Теоретическая и практическая значимость. Разработанная методика позволяет рассчитать теоретические потоки в линиях водорода, гелия и кальция, которые представляют собой основные химические элементы не только в хромосфере Солнца, но и в хромосферах звёзд, похожих на Солнце. Это позволяет применить некоторые выводы работы для интерпретации результатов спектральных исследований других звезд, где невозможно прямо наблюдать конкретные источники излучения в хромосфере. Многослойная модель вспышки, предложенная в работе, позволяет определить распределение по высоте температуры в хромосферных источниках излучения, в том числе на разных стадиях вспышки, что даёт возможность наложить дополнительные ограничения на соответствующий механизм нагрева и на роль отдельных факторов, в частности теплопроводности и лучистого охлаждения, что важно для развития модели солнечной вспышки.

6. Замечания по работе. При ознакомлении с текстом возник ряд вопросов и замечаний, не снижающих положительное впечатление от работы.

1. Для всех вспышек в работе измерена турбулентная скорость, но в описании модели этот параметр отсутствует. Можно предположить, что турбулентная скорость входит в модель через доплеровскую ширину линии, но формулы для доплеровской ширины в работе тоже нет. В целом, желательно было бы явно прояснить механизм расчета этого параметра: правильно ли я понимаю, что из ширины линии убирался вклад температуры, а всё остальное относилось на турбулентность? Можно ли в рамках модели без дополнительных предположений отличить турбулентность от упорядоченного движения плазмы?

2. Для ряда вспышек многослойная модель (например, 4 слоя по 4 параметра = 16 параметров) не может быть однозначно построена по 6 спектральным линиям. Есть ли в данном случае строгий алгоритм поиска оптимального решения или пока речь идет об индивидуальном «ручном» подборе параметров для сложных событий? Как в целом, происходит поиск решения: ищется один параметр, потом он фиксируется и ищется второй и так далее или варьируются все параметры сразу? В целом, в работе недостаточно ясно изложена итерационная процедура.

3. Находятся ли слои в источнике в газодинамическом равновесии с учетом силы тяготения и накладывалось ли такое ограничение при расчетах?

4. В работе использованы абсолютно калиброванные потоки излучения в спектральных линиях, что, в целом, представляет собой непростую задачу. Автор производил калибровку самостоятельно или потоки были получены от наблюдателей в готовом виде? Есть ли у автора информация о точности калибровки?

В работе также есть несколько неточностей, не влияющих на выводы к работе:

5. На рисунках 3.1 и 3.4, судя по всему, неправильно обозначены единицы измерения по оси Y: не «эрг см⁻² с⁻¹» а «Вт м⁻² с⁻¹»

6. В таблице 1 приведены потоки излучения в оптических линиях порядка 10⁶ «эрг см⁻² с⁻¹. При пересчёте их от орбиты Земли на Солнце

получаются неадекватные величины. Вероятно, здесь они уже пересчитаны от Земли на уровень хромосферы, что не указано. При этом на той же странице потоки для мягкого рентгена в тех же единицах указаны для орбиты Земли. Это создает путаницу при чтении.

7. Стр. 19: *благодаря быстрому нагреву хромосферы реализуется испарение вещества в корону, которое называют хромосферной конденсацией.* Нет, оно так и называется «хромосферным испарением», конденсация это другое.

8. На стр. 42 не определена величина E_2 в формуле (2.11)

9. На стр. 56 обсуждается возможность формирования ударных волн, поскольку турбулентная скорость значительно превышает скорость звука в среде. В условиях атмосферы Солнца всё же правильнее сравнивать скорость движения плазмы с магнитозвуковой скоростью.

10. Для вспышки 7 июня 2011 года объект исследования постоянно называется «сгусток газа» (*сгусток газа наблюдался, сгусток газа образовался* и т.д.). На мой взгляд это обычный протуберанец.

В работе присутствует некоторое количество опечаток и грамматических ошибок, не искажающих смысл текста. В целом, работа оформлена хорошо.

7. Заключение. Указанные замечания не влияют на качество работы и моё положительное мнение о ней как оппонента. Диссертация В.А. Малютина является завершённой научно-квалификационной работой, посвящённой актуальному вопросу диагностики состояния плазмы в солнечных вспышках по оптическим спектральным линиям и выполненной на высоком научном уровне. Диссертация отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В.Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует специальности 1.3.1. Физика космоса, астрономия (по физико-математическим наукам), а также критериям, определенным пп. 2.1-2.5

Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В.Ломоносова, а также оформлена согласно требованиям Положения о совете по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова.

Таким образом, соискатель Малютин Виктор Александрович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.1. Физика космоса, астрономия.

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук, профессор РАН, заведующий лабораторией солнечной астрономии и гелиофизического приборостроения отдела физики космической плазмы Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт космических исследований Российской академии наук», инженер 1-й категории лаборатории 4.02 Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт солнечно-земных связей Сибирского отделения Российской академии наук»

Богачёв Сергей Александрович

27 апреля 2026 года

Контактные данные:

тел.: +7-495-333-52-12, e-mail: bogachev.sergey@cosmos.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена диссертация: 01.03.02 – Астрофизика и радиоастрономия

Адрес места работы:

117997, г. Москва, ул. Профсоюзная, д. 84/32.

ИКИ РАН, отдел физики космической плазмы

Тел.: +7-495-333-52-12; e-mail: iki@cosmos.ru

Подпись Богачева С.А. удостоверяю

Учёный секретарь ИКИ РАН

А. М. Садовский