

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Физический институт им. П. Н. Лебедева Российской академии наук

На правах рукописи

Лобода Иван Петрович

МЕЛКОМАСШТАБНЫЕ ТРАНЗИЕНТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ
В НИЖНЕЙ КОРОНЕ СОЛНЦА

Специальность 01.03.02 — «Астрофизика и звёздная астрономия»

Автореферат диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2019

Работа выполнена в Физическом институте им. П. Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН).

Научный руководитель **Богачёв Сергей Александрович**, доктор физико-математических наук, профессор РАН

Официальные оппоненты **Чуразов Евгений Михайлович**, доктор физико-математических наук, академик РАН, ведущий научный сотрудник Института космических исследований РАН (ИКИ РАН)

Шугай Юлия Сергеевна, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник НИИ ядерной физики имени Д. В. Скобельцына МГУ (НИИЯФ МГУ)

Ведущая организация Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн имени Н. В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН)

Защита состоится «3» марта 2020 г. в 14 ч. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 002.023.01 Физического института им. П. Н. Лебедева РАН по адресу: г. Москва, ул. Профсоюзная, д. 84/32, подъезд А2, Институт космических исследований РАН, зал семинаров – к. 707.

С диссертацией и авторефератом можно ознакомиться в библиотеке Физического института им. П. Н. Лебедева РАН по адресу: 119991, г. Москва, Ленинский проспект, д. 53, и на сайтах ФИАН <http://www.lebedev.ru> и <http://www.asc-lebedev.ru> в разделе «Диссертационный совет». Заверенные отзывы направлять по адресу: 119991, г. Москва, Ленинский проспект, д. 53, ФИАН (АКЦ), диссертационный совет Д 002.023.01.

Автореферат разослан «20» декабря 2019 г.

Учёный секретарь диссертационного совета

доктор физико-математических наук

Ю. А. Ковалев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования и степень её разработанности

Исследование транзиентных явлений в космической плазме в применении к атмосферам звёзд, а на более крупных масштабах — к активным ядрам галактик, является одним из наиболее актуальных вопросов современной астрофизики [1; 2]. Несмотря на различие условий формирования и на широкий диапазон размеров и характерных времён этих событий, в их основе могут лежать схожие физические процессы, в первую очередь — механизмы нагрева и ускорения космической плазмы, а также её взаимодействия с магнитным полем. Среди множества астрофизических объектов, в приложении к которым могут исследоваться данные вопросы, особое место занимает Солнце. Благодаря его близости к Земле, многие процессы, характерные для космической электродинамики в целом, могут быть изучены с недоступным нигде более уровнем детализации. Другим преимуществом является существенный объём экспериментальных данных по динамике плазмы, поступающий в ходе наблюдений Солнца. Это позволяет изучать большое число активных структур (например, джетов) статистическими методами, возможность применения которых часто ограничена при исследовании движений вещества в объектах звёздной и галактической астрономии. В частности, наблюдения Солнца позволяют установить роль подобных транзиентных явлений в формировании горячих атмосфер у других звёзд схожего спектрального класса.

Известно, что энергия реакций ядерного синтеза, протекающих в ядре Солнца и звёзд солнечного типа, передаётся через зоны лучистого и конвективного переноса в его атмосферу [3]. Большая часть этой энергии покидает Солнце в виде излучения, имеющего непрерывный тепловой спектр и формирующегося видимой поверхностью Солнца — фотосферой. Вышележащие слои солнечной атмосферы — хромосфера и корона — имеют линейчатый спектр и, в целом, прозрачны для излучения [4]. Спектроскопические данные показывают, что в короне имеются ионы высокой степени ионизации, существование которых возможно при температурах выше 1 млн К [5], тогда как для хромосферы характерны гораздо более низкие температуры в диа-

пазоне от 3800 до 35 тыс. К [6]. Падение плотности и одновременный рост температуры на два порядка величины происходит в тонком переходном слое толщиной около 100 км, разделяющем хромосферу и корону Солнца. Хромосфера и нижняя корона, вероятно, также принимают участие в ускорении солнечного ветра, собственной тепловой энергии частиц которого недостаточно для того, чтобы преодолеть гравитационное притяжение Солнца. При этом конкретные механизмы формирования горячей короны Солнца и ускорения солнечного ветра остаются до настоящего времени нерешённой задачей [7].

Согласно современным представлениям, дифференциальное вращение Солнца, а также движения вещества в конвективном слое создают за счёт механизма солнечного динамо сложную и непрерывно меняющуюся конфигурацию магнитного поля внутри и над поверхностью Солнца [8; 9]. Области концентрации магнитного поля, проникающие в солнечную атмосферу, являются местом формирования наиболее крупных явлений активности, интенсивность которых периодически меняется в течение 11-летнего солнечного цикла. Наиболее характерными крупномасштабными явлениями, связанными с активными областями Солнца, являются солнечные вспышки и корональные выбросы массы (КВМ). Участки поверхности Солнца, свободные от крупномасштабной активности, являются местом формирования транзитных явлений малого размера. Здесь можно выделить так называемые области спокойного Солнца, а также корональные дыры, характеризующиеся открытой структурой магнитного поля, и являющиеся, по всей видимости, источником быстрой компоненты солнечного ветра [10]. При этом физические условия спокойной солнечной атмосферы слабо зависят от фазы цикла активности Солнца. Это позволяет предположить, что мелкомасштабные явления в хромосфере и нижней короне, интенсивность которых, в отличие от крупномасштабной активности Солнца, не имеет периодического характера, могут иметь существенное значение для механизмов нагрева короны и поддержания баланса массы солнечного ветра [11; 12].

Мелкомасштабные транзитные явления, наблюдаемые в спокойной солнечной атмосфере, можно разделить на две основные группы, сильно различающиеся по своей динамике: протуберанцы малого размера — относитель-

но стабильные образования — и джеты, представляющие собой струеобразные выбросы вещества. Солнечные джеты, в свою очередь, также могут быть разделены на несколько классов. Наиболее изученной их разновидностью являются спикюлы, хорошо различимые за лимбом Солнца в характерных спектральных линиях хромосферы [13]. При этом было показано, что спикюлы не могут обеспечить достаточный приток горячей плазмы в корону для поддержания баланса массы солнечного ветра [14]. Помимо хромосферных джетов, к которым относятся спикюлы, существуют также более крупные джеты в нижней короне Солнца, наблюдаемые в диапазоне вакуумного ультрафиолета (ВУФ) — так называемые макроспикюлы, роль которых в балансе массы и энергии солнечной атмосферы до сих пор остаётся малоизученной.

Макроспикюлы обладают структурным сходством с хромосферными спикюлами, однако имеют значительно более крупные размеры и наблюдаются преимущественно в спектральных линиях, характерных для переходного слоя Солнца, в первую очередь He II 304 Å. Для них также характерны более высокие по сравнению со спикюлами скорости движения плазмы, при этом вещество макроспикюл может достигать температур, близких к корональным [15]. Соответственно, макроспикюлы могут играть значительную роль в балансе массы и энергии солнечной атмосферы: согласно оценке, приведённой в работе [16], характерная энергия, необходимая для формирования одной макроспикюлы, в среднем на два порядка превышает характерную энергию формирования хромосферных спикюл. Макроспикюлы преимущественно обнаруживаются в области корональных дыр, в связи с чем могут играть также существенную роль в формировании быстрой компоненты солнечного ветра [17]. Несмотря на предпринятые в последнее время попытки детального исследования [18; 19], механизм формирования макроспикюл остаётся неизвестным, что в первую очередь объясняется недостаточно высоким пространственным и временным разрешением наблюдений в ВУФ диапазоне спектра до настоящего времени.

В отличие от макроспикюл, представляющих собой быстро движущиеся, узконаправленные струи вещества, протуберанцы — гораздо более стабильные образования, удерживаемые над поверхностью Солнца за счёт слож-

ной конфигурации магнитного поля [20]. Нарушение равновесия магнитной структуры протуберанца может приводить к выбросу, или эрупции, части его вещества и вмороженного в него магнитного поля Солнца [21]. Показано, что эрупции протуберанцев в большинстве случаев приводят к формированию КВМ [22]. Наименее устойчивые и динамичные протуберанцы ассоциированы, как правило, с активными областями Солнца, в то время как протуберанцы в спокойных областях, рассматриваемые в настоящей работе, являются значительно более стабильными и долгоживущими образованиями, часто наблюдаемыми в течение нескольких оборотов Солнца. В настоящее время при изучении спокойных протуберанцев исследованию подвергаются прежде всего крупные и, соответственно, наиболее доступные для наблюдения единичные события. Следствием такого подхода становится, однако, малая репрезентативность полученных данных, в то время как для понимания роли протуберанцев в балансе массы и энергии солнечной атмосферы значительный интерес представляет изучение полного ансамбля протуберанцев, особенно в области мелкомасштабных событий, слабо исследованной до сих пор.

В конце XX века возможности изучения внеатмосферных объектов значительно расширились за счёт активного развития космической техники, позволившей проводить исследования в спектральных диапазонах, не доступных ранее для наблюдения с Земли. В приложении к исследованиям плазмы на Солнце, последние два десятилетия ознаменовались особенно быстрым ростом пространственного и временного разрешения наблюдений (аппараты SOHO/EIT, TRACE, Hi-C), обеспечившим возможность детального изучения мелкомасштабных явлений в атмосфере Солнца [23]. Источником данных, использованных в настоящей работе, являются телескопы ВУФ диапазона обсерватории ТЕСИС на спутнике КОРОНАС-Фотон [24], а также комплекс ВУФ телескопов AIA обсерватории SDO [25]. Высокая чувствительность телескопов ТЕСИС позволила получать серии изображений Солнца с рекордно высоким для ВУФ диапазона временным разрешением, необходимым для детального изучения быстротекающих явлений в атмосфере Солнца. Немаловажно также, что работа обсерватории совпала с периодом глубокого минимума солнечной активности 2009 года, наиболее благоприятным

для изучения мелкомасштабных транзиентных явлений. С другой стороны, большой объём данных SDO/AIA предоставляет обширный материал для проведения статистического анализа на больших выборках мелкомасштабных событий и, таким образом, удачно дополняет наблюдения ТЕСИС.

Цели и задачи исследования

Цель работы состоит в исследовании динамики и энергетики мелкомасштабных транзиентных явлений в нижней короне Солнца — протуберанцев и макроспикул — по данным телескопических спутниковых наблюдений в ВУФ диапазоне спектра.

Для достижения поставленной цели потребовалось решить следующие основные задачи:

- исследовать ансамбль мелкомасштабных протуберанцев в минимуме солнечной активности; получить оценку их массы и гравитационной энергии; измерить спектр гравитационной энергии протуберанцев;
- исследовать динамику макроспикул с высоким временным разрешением; восстановить продольное поле скоростей макроспикул; оценить потери вещества в них;
- провести статистическое исследование пространственных и динамических характеристик макроспикул в корональных дырах и в областях спокойного Солнца; определить возможный механизм формирования макроспикул;
- оценить роль указанных мелкомасштабных транзиентных явлений в балансе массы и энергии солнечной короны.

Научная новизна

В ходе диссертационного исследования были впервые получены следующие результаты:

- получено распределение солнечных протуберанцев по массе и гравитационной энергии;

- получена оценка суммарной массы и гравитационной энергии ансамбля протуберанцев;
- исследована динамика макроспикул с рекордным для ВУФ диапазоном временным разрешением 3.5–6.0 с;
- восстановлено поле продольных скоростей плазмы в макроспикулах;
- измерены потери вещества в макроспикулах и исследован их вклад в формирование быстрой компоненты солнечного ветра;
- показана небаллистическая природа движения макроспикул с параболическими профилями движения;
- установлена сильная корреляция между начальной скоростью и ускорением макроспикул, наблюдавшаяся ранее только для хромосферных джетов.

Теоретическая и практическая значимость

- Изучение роли мелкомасштабных транзиентов в балансе массы и энергии нижней короны Солнца важно для понимания характеристик атмосфер звёзд близкого спектрального класса, прямое наблюдение которых с достаточным разрешением невозможно.
- Составленный в ходе настоящей работы подробный каталог спокойных и спокойно-эруптивных протуберанцев в минимуме солнечной активности между 23 и 24 солнечными циклами представляет самостоятельную ценность, а также даёт возможность для совместного изучения протуберанцев и КВМ.
- Полученные распределения физических характеристик протуберанцев важны для проверки существующих моделей образования и эрупции протуберанцев, а также для понимания их роли в балансе массы и энергии солнечной атмосферы.
- Полученная форма спектра гравитационной энергии протуберанцев позволяет предположить существенную роль мелкомасштабных протуберанцев в балансе массы и энергии солнечной короны и атмосфер звёзд

солнечного типа. Показано, что для их дальнейшего исследования необходимы наблюдения не только с более высоким пространственным, но и более высоким временным разрешением.

- Полученные оценки потерь вещества в макроспикулах подтверждают сделанные ранее предположения об их существенной роли в балансе массы солнечной короны и могут служить основой для дальнейших исследований и моделирования.
- Полученные распределения пространственных и динамических характеристик макроспикул позволяют уточнить классификацию солнечных джетов.
- Обнаруженные особенности движения макроспикул накладывает значительные ограничения на существующие модели их образования и эволюции, что имеет существенное теоретическое значение.
- В ходе диссертационной работы был разработан ряд моделей и методов обработки данных, которые могут быть применены для широкого круга задач солнечной физики. В частности, алгоритм автоматического детектирования протуберанцев может быть применён для анализа данных наблюдения других солнечных телескопов, таких как SOHO/EIT, STEREO/EUVI и SDO/AIA.

Методология и методы исследования

Результаты работы были получены на основе наблюдений Солнца в ВУФ диапазоне спектра, проведённых с помощью современных космических телескопов. Для обработки полученных данных были использованы методы частотной фильтрации изображений, нахождения и коррекции фонового сигнала, интерполяции и геометрического преобразования изображений, а также методы математической морфологии. При последующем анализе и интерпретации полученных результатов использовались статистические методы обработки данных, процедуры линейной и нелинейной аппроксимации экспериментальных данных, численные методы решения обыкновенных диф-

ференциальных уравнений, а также модели формирования и распространения излучения в полностью ионизованной плазме.

Положения, выносимые на защиту

- Спектр гравитационной энергии протуберанцев в диапазоне от 4×10^{28} до 6×10^{30} эрг является степенным с показателем, равным -1.1 ± 0.2 , что свидетельствует о равномерном распределении энергии по ансамблю протуберанцев. В протуберанцах в указанном диапазоне одновременно на всём Солнце содержится порядка 10^{15} – 10^{17} г вещества; общая гравитационная энергия протуберанцев составляет порядка 10^{29} – 10^{31} эрг.
- Потери вещества в макроспикулах являются существенными и составляют, в среднем, от 10 до 30 % от видимой массы макроспикулы, в отдельных случаях достигая 80 %. Это соответствует суммарным потерям вещества порядка 10^{11} г/с, или около 5–10 % полного потока солнечного ветра, и указывает на заметную роль макроспикул в формировании быстрой компоненты солнечного ветра.
- Ускорение макроспикул в 35 % случаев превышает ускорение свободного падения вблизи поверхности Солнца, а также не согласуется с наклоном макроспикул относительно нормали; таким образом, движение вещества макроспикул не является чисто баллистическим. При этом существует сильная корреляция между начальной скоростью и ускорением макроспикулы, аналогичная той, что наблюдается для хромосферных солнечных джетов, и которая может быть описана в рамках модели ускорения вещества макроспикулы периодической ударной волной.

Степень достоверности

Достоверность результатов, полученных в настоящей работе, обеспечивается использованием данных наиболее современных солнечных телескопов, обладающих достаточным пространственными и временным разрешением для выполнения поставленных задач, подробным описанием используемых данных наблюдений и методов обработки изображений, апробацией полу-

ченных результатов на российских и зарубежных конференциях, а также их публикацией в ведущих научных изданиях по исследуемой тематике.

Апробация результатов

Все результаты, приведённые в работе, были представлены автором в ряде докладов на 4 всероссийских и 8 международных конференциях: 55-я Всероссийская научная конференция МФТИ (Москва–Долгопрудный, 2012 г.); 5-я Всероссийская молодёжная конференция по фундаментальным вопросам и инновационным аспектам современной физики (Москва, 2013 г.); “The Sun: Active and Quiet” — 2013 International Moscow Workshop on Solar Physics (Москва, 2013 г.); 1st SOLARNET Spring School: “Introduction to Solar Physics” (Вроцлав, Польша, 2014 г.); 7th Solar Information Processing Workshop (Ла-Рош-ан-Арден, Бельгия, 2014 г.); Научная сессия НИЯУ МИФИ-2015, конференция «Фундаментальные исследования и физика частиц» (Москва, 2015 г.); Hinode 9 International Science Meeting (Белфаст, Великобритания, 2015 г.); 6-я Всероссийская молодёжная конференция по фундаментальным и инновационным вопросам современной физики (Москва, 2015 г.); 4th SOLARNET Workshop on “Solar eruptive events: Observations and Modelling” (Маллардовская лаборатория космических исследований, Великобритания, 2016 г.); Joint Hinode-11/IRIS-8 Science Meeting (Сиэтл, США, 2017 г.); Russian-UK workshop “Seismology of Solar Coronal Active Regions” (Москва, 2018 г.); Конференция «Магнетизм, циклы активности и вспышки на Солнце и звёздах» (КрАО, Научный, 2018 г.).

Также, автору диссертации была присуждена премия им. Д. В. Скобельцина на конкурсе молодёжных научных работ ФИАН в 2015 г. за цикл работ «Статистическое исследование спокойных протуберанцев в минимуме солнечной активности».

Публикации по теме диссертации

Все результаты диссертационной работы опубликованы в рецензируемых научных изданиях и сборниках трудов научных конференций. Всего

опубликовано 12 работ [A1—A3; B1—B9], включая 7 тезисов докладов конференций [B1—B5; B7; B8]. Основные результаты диссертации, выносимые на защиту, изложены в 3 работах [A1—A3] в ведущих научных журналах, входящих в международные базы цитирования Web of Science и Scopus и удовлетворяющих требованиям Высшей аттестационной комиссии (ВАК) при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации.

- A1. *Loboda I. P., Bogachev S. A.* Quiescent and Eruptive Prominences at Solar Minimum: A Statistical Study via an Automated Tracking System // *Solar Physics*. — 2015. — Vol. 290, issue 7. — P. 1963–1980.
- A2. *Loboda I. P., Bogachev S. A.* Plasma dynamics in solar macrospicules from high-cadence extreme-UV observations // *Astronomy & Astrophysics*. — 2017. — Vol. 597. — A78 (8 страниц).
- A3. *Loboda I. P., Bogachev S. A.* What is a Macrospicule? // *The Astrophysical Journal*. — 2019. — Vol. 871, issue 2. — 230 (14 страниц).
- B1. *Лобода И. П., Богачёв С. А.* Исследование коронального выброса массы от 26.09.2009 по данным наблюдений, полученным в эксперименте ТЕСИС на спутнике КОРОНАС-Фотон в линии He II 304 Å // *Труды 55-й научной конференции МФТИ. Общая и прикладная физика*. — 2012. — С. 97.
- B2. *Loboda I., Bogachev S.* A statistical study of quiescent and eruptive prominences at solar minimum via an automated tracking system // *7th Solar Information Processing Workshop. Abstract Book*. — 2014. — P. 52.
- B3. *Лобода И. П., Богачёв С. А.* Статистическое исследование спокойных протуберанцев в минимуме солнечной активности // *VI всероссийская молодежная конференция по фундаментальным и инновационным вопросам современной физики. Сборник трудов*. — 2015. — С. 147.
- B4. *Лобода И. П., Богачёв С. А.* Поле скоростей и потери вещества солнечных макроспикул по данным наблюдений в линии He II 304 Å с высоким временным разрешением // *Научная сессия НИЯУ МИФИ-2015. Аннотации докладов. Т. 1*. — 2015. — С. 49.

- B5. *Loboda I.* Dynamics of solar macrospicules from high-cadence EUV observations // Hinode 9 abstracts. — 2015. — P. 173.
- B6. *Loboda I. P., Bogachev S. A.* Velocity Field and Loss of Mass in Solar Macrospicules from High Time Resolution Observations in the He II 304 Å Spectral Line // Physics Procedia. — 2015. — Vol. 74. — P. 328–335.
- B7. *Loboda I.* Variations of the EUV jets' properties // Abstracts 2017 Hinode/IRIS Meeting. — 2017. — P. 41.
- B8. *Лобода И. П.* Статистическое исследование линейных джетов в нижней короне Солнца // Магнетизм, циклы активности и вспышки на Солнце и звёздах. Сборник тезисов. — 2018. — С. 31.
- B9. *Loboda I. P., Bogachev S. A.* A statistical study of linear jets in the low solar corona // Astronomical and Astrophysical Transactions. — 2019. — Vol. 31, issue 2. — P. 199–208.

Личный вклад автора

Автор самостоятельно провёл полную обработку данных спутниковых наблюдений, разработав для этой цели все необходимые методы обработки изображений и реализовав их в виде комплекса программных процедур на языке программирования IDL. Также, автором был создан ряд оценочных моделей для нахождения основных физических характеристик исследуемых объектов, осуществлена обработка и последующая научная интерпретация полученных данных, подготовлен полный текст перечисленных выше публикаций с изложением основных результатов работы. Таким образом, вклад автора диссертации в проведённое исследование и результаты, выносимые на защиту, является основным.

Структура и объём диссертации

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы. Объём диссертации составляет 233 страницы, включая 63 рисунка и 10 таблиц; список литературы включает в себя 429 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность исследуемой темы, сформулированы цель и задачи диссертационной работы, перечислены полученные в диссертации основные результаты, показана их научная ценность, представлены положения, выносимые на защиту, описана структура диссертации.

В первой главе приводится краткий обзор истории и современного состояния исследований двух основных классов мелкомасштабных транзиентных явлений в спокойных областях нижней короны Солнца, изучаемых в настоящей работе. В разделе 1.1 даётся краткое описание протуберанцев и их классификации по месту образования и динамике, приводятся полученные ранее результаты наблюдений протуберанцев, включая физические характеристики их вещества и структуру поддерживающего их магнитного поля, даётся обзор существующих на данный момент моделей образования и эрупции протуберанцев. В разделе 1.2 приведены результаты предшествующих исследований макроспикул с указанием их основных наблюдаемых характеристик, а также обсуждается связь макроспикул с другими типами солнечных джетов — спикулами и корональными джетами, — для которых также даётся краткое описание.

Во второй главе приводятся результаты статистического исследования ансамбля спокойных и спокойно-эруптивных протуберанцев. В разделе 2.1 дано описание использованных данных наблюдений, полученных с помощью ВУФ телескопов космического эксперимента ТЕСИС на российском спутнике КОРОНАС-Фотон. Были использованы монохроматические изображения Солнца в линии He II 304 Å, полученные на протяжении периода с августа по ноябрь 2009 г. и регистрирующие корону Солнца вплоть до расстояний около одного радиуса Солнца от его поверхности. Изображения имеют угловое разрешение 1,7'' и временное разрешение 4 мин, что достаточно для детального изучения протуберанцев, в том числе малого масштаба.

В разделе 2.2 описываются использованные методы обработки изображений, включавшие в себя предварительную обработку массива изображений (п. 2.2.1), преобразование исследуемой области (п. 2.2.2), нахождение

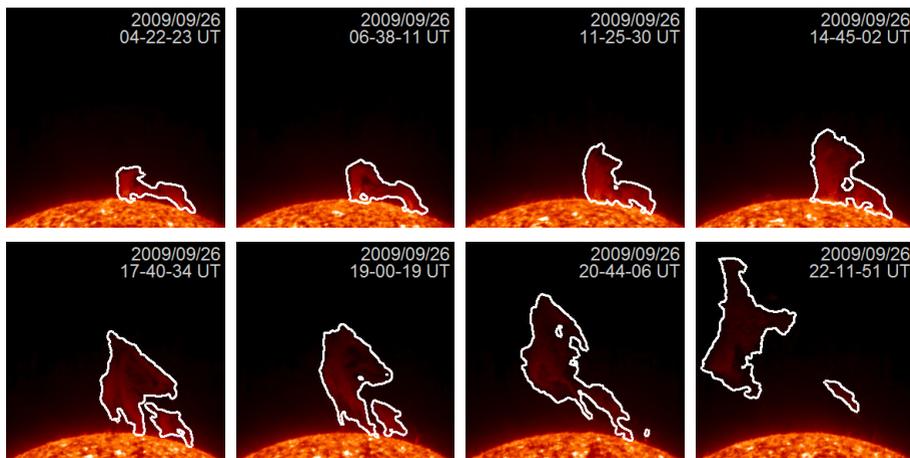


Рисунок 1. Автоматическое детектирование протуберанца. Детектированная область обозначена белым контуром; интенсивность изображений приведена в логарифмическом масштабе. Результат диссертанта из работы [A1].

фонового сигнала и его аппроксимацию с помощью аналитической модели (п. 2.2.3), а также последующее нормирование изображений для устранения существенных неоднородностей интенсивности в радиальном направлении (п. 2.2.4). Далее, в разделе 2.3 описывается алгоритм автоматического детектирования протуберанцев на отдельных изображениях (п. 2.3.1), приводятся модели, использованные для оценки их объёма, массы и гравитационной энергии (2.3.2), и описывается методика отслеживания протуберанцев на серии последовательных изображений (п. 2.3.3). Пример работы алгоритма представлен на рис. 1. Данный алгоритм обеспечивает широкий динамический диапазон детектирования и надёжное определение геометрических размеров протуберанцев. По результатам его работы был составлен каталог событий с указанием основных пространственных, динамических и массово-энергетических характеристик протуберанцев.

В разделе 2.4 приводятся результаты статистического анализа полученных данных. При исследовании основных пространственных и динамических характеристик протуберанцев (п. 2.4.1) было показано, что продольный

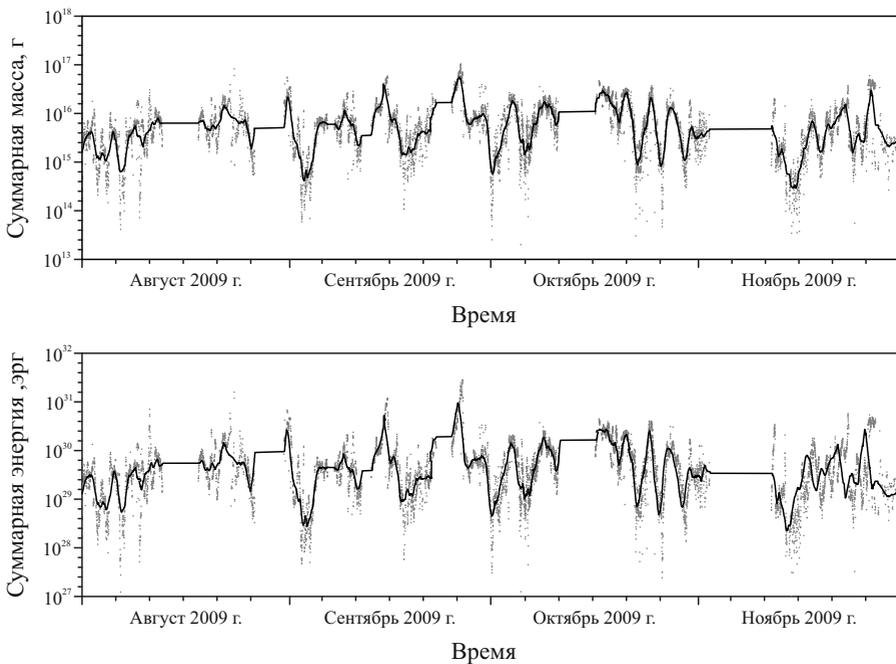


Рисунок 2. Суммарная масса и гравитационная энергия наблюдавшихся протуберанцев как функция времени. Результат диссертанта из работы [A1].

(вдоль лимба) и поперечный (в радиальном направлении) размер зарегистрированных событий находится в диапазоне от 25×25 до 500×150 тыс. км соответственно. При этом характерный размер большей части протуберанцев не превышает 70 тыс. км ($1/10$ радиуса Солнца), т. е. были изучены преимущественно мелкомасштабные структуры. Широтное распределение протуберанцев свидетельствует об их преимущественной концентрации вблизи средних и низких широт: более 95 % протуберанцев расположены на гелиографических широтах ниже $\pm 60^\circ$ симметрично относительно экватора Солнца. Измеренные значения средней скорости движения, для более чем 92 % протуберанцев не превышающие 3 км/с, характеризуют их как стабильные и малоподвижные структуры. Помимо этого, было установлено малое время

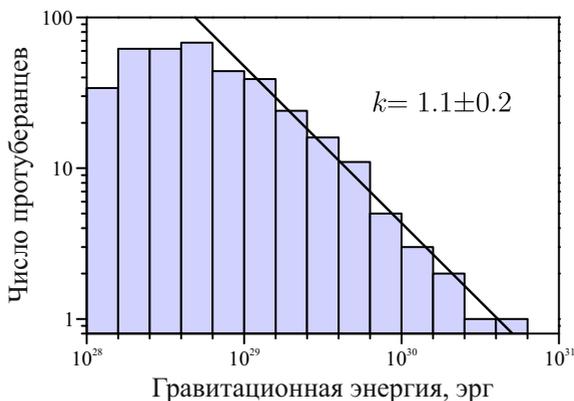


Рисунок 3. Спектр гравитационной энергии протуберанцев. Результат диссертанта из работы [A1].

жизни мелкомасштабных событий, составляющее в 75 % случаев не более 24 часов и находящееся в прямой зависимости от размеров протуберанца. Сравнительное исследование спокойных и спокойно-эруптивных протуберанцев показало, что последние обладают на 85 % большими линейными размерами, в 2.5 раза большими временами жизни и в 2.85 раза большими максимальными скоростями движения в сравнении со спокойными протуберанцами.

Полученные данные позволили также исследовать распределения протуберанцев по массе и гравитационной энергии (п. 2.4.2). Показано, что массы зарегистрированных событий находятся в диапазоне от 3.5×10^{13} до 2.7×10^{16} г, энергии — в диапазоне от 2.8×10^{27} до 6.0×10^{30} эрг, при этом суммарная масса и гравитационная энергия всех одновременно существующих на Солнце протуберанцев данного масштаба составляют 10^{15} – 10^{17} г и 10^{29} – 10^{31} эрг соответственно (рис. 2). Основным результатом данной главы является определение формы спектра гравитационной энергии протуберанцев (рис. 3). Показано, что в достоверно исследованном диапазоне энергий свыше 4×10^{28} эрг он имеет степенной вид с показателем степени, равным -1.1 ± 0.2 . Близость полученного значения к -1 свидетельствует о равномерном распределении энергии по протуберанцам различного масштаба и,

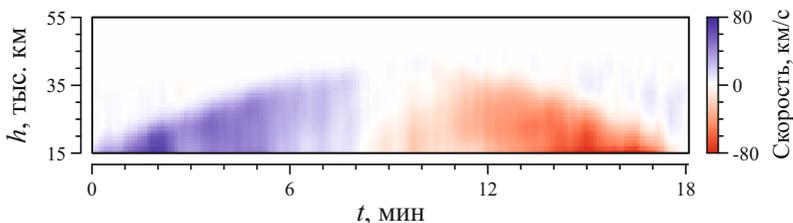


Рисунок 4. Пространственно-временная карта восстановленного поля продольных скоростей макроспикулы. Результат диссертанта из работы [A2].

соответственно, о возможно существенной роли протуберанцев малого размера в балансе массы и энергии солнечной атмосферы при экстраполяции указанной зависимости в область меньших значений энергии.

В третьей главе проводится изучение динамики макроспикул и доли потерь вещества в них по данным наблюдений в ВУФ диапазоне с рекордно высоким временным разрешением. В разделе 3.1 даётся описание серий наблюдений с временным разрешением 3.5–6.0 с, полученных ВУФ телескопами ТЕСИС наряду с программой синоптических наблюдений. Изображения были получены для неполного поля зрения и включали области вблизи северного полюса Солнца.

В разделе 3.2 описаны использованные методы числовой обработки данных, включая отделение макроспикулы от смежных активных явлений и определение её оси на изображениях, нахождение линейной плотности вещества вдоль оси макроспикулы (п. 3.2.1), построение пространственно-временной карты плотности, устранение шумов и вычитание фона (п. 3.2.2). После этого описывается метод восстановления одномерного поля скоростей плазмы вдоль оси макроспикулы и его эволюции во времени (п. 3.2.3), а также метод аппроксимации временного профиля движения вершины макроспикулы (п. 3.2.4).

В разделе 3.3 приводятся результаты изучения 36 обнаруженных макроспикул, для 18 из которых была восстановлена эволюция поля скоростей (п. 3.3.1, рис. 4). Помимо этого, были получены основные динамические

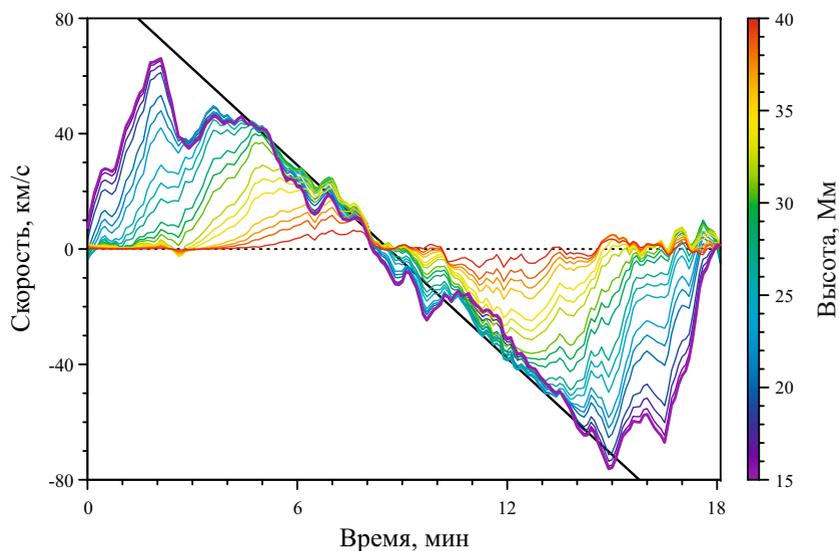


Рисунок 5. Изменение скорости макроспикулы на различных высотах вдоль её оси (цветные линии) и профиль скорости, соответствующий параболическому движению её вершины (чёрная линия). Результат диссертанта из работы [A2].

характеристики для 15 из этих макроспикул, вершины которых имели параболические профили движения: предельная высота подъёма, полное время жизни, начальная скорость и ускорение. Было показано, что во всех указанных случаях профиль изменения скорости близок к линейному и имеет сходный характер на всех высотах, которых достигает вещество макроспикулы, а также близко соответствует параболическому профилю движения её вершины (рис. 5).

Данный результат позволяет определить потери вещества в макроспикуле за время её жизни в короне в предположении, что тело макроспикулы перемещается как целое со скоростью, соответствующей параболическому профилю движения её вершины (п. 3.3.2). Для большинства исследованных макроспикул потери составили от 10 до 30 % их видимого вещества, происшедшие, по всей видимости, вследствие его нагрева и последующего слияния

с плазмой короны. В отдельных случаях относительные потери вещества достигали 50–80 %, что сопровождалось заметным ослаблением интенсивности излучения макроспикулы в рассматриваемом спектральном диапазоне по мере её движения в короне. Исходя из характерных физических параметров макроспикул было оценено, что их вклад в общий баланс массы солнечного ветра составляет порядка 10^{11} г/с, что соответствует 5–10 % от полного потока его вещества, измеряемого на расстояниях вблизи 1 а.е.

В четвёртой главе проводится статистический анализ пространственных и динамических характеристик ансамбля макроспикул с целью установления вероятного механизма их формирования. В разделе 4.1 описывается использованный для этой цели массив монохроматических изображений Солнца в линии He II 304 Å, полученных комплексом ВУФ телескопов AIA космической обсерватории SDO, имеющих угловое разрешение $0.6''$ и временное разрешение 12 с. Общая продолжительность наблюдений, проведённых в период с июня 2010 г. по июнь 2015 г., составила 90 ч. В разделе 4.2 приводится краткое описание применявшейся процедуры обработки данных для поиска отдельных событий за лимбом и получения основных пространственных и динамических характеристик макроспикул.

В результате были измерены характеристики 330 макроспикул, 63 % из которых наблюдались в корональных дырах и, соответственно, 37 % — в областях спокойного Солнца. Анализ полученных данных приведён в разделе 4.3. В первую очередь, был исследован средний темп появления макроспикул (п. 4.3.1), составивший $2.3 \times 10^{-2} \text{ с}^{-1}$ для макроспикул в корональных дырах, что заметно выше среднего темпа $7.2 \times 10^{-3} \text{ с}^{-1}$, полученного для областей спокойного Солнца. Полученные распределения пространственных (п. 4.3.2) и динамических (п. 4.3.3) характеристик зарегистрированных событий позволили охарактеризовать ансамбль макроспикул в целом и провести более чёткую границу между макроспикулами и другими классами морфологически сходных транзитных явлений — в первую очередь спикулами и корональными джетами. Так, средняя высота подъёма и диаметр макроспикул были определены как 16–32 тыс. км и 3–6 тыс. км соответственно, тогда как характерная для них начальная скорость подъёма составила 70–140 км/с,

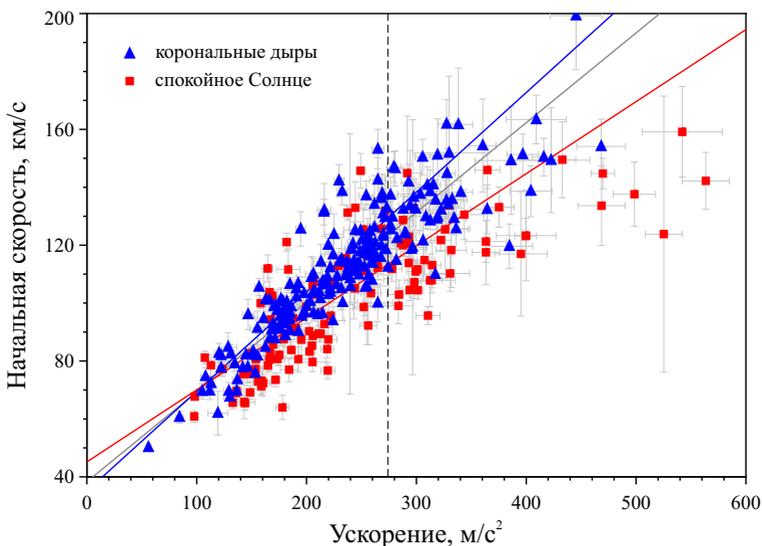


Рисунок 6. Корреляция начальной скорости и ускорения макроспикул. Результат диссертанта из работы [А3].

время жизни — от 13 до 18 мин. Помимо этого, были исследованы взаимные корреляции полученных характеристик макроспикул (п. 4.3.4), продемонстрировавшие зависимость угла наклона макроспикул в корональных дырах от их гелиографической широты, а также естественную взаимосвязь между высотой подъёма, временем жизни и начальной скоростью движения макроспикул.

При этом было показано, что существенная доля макроспикул (35 %) имеет ускорения, превосходящие по абсолютному значению те, которые можно было бы ожидать в случае свободного, или баллистического, движения их вещества в поле тяготения Солнца. Таким образом, можно говорить о наличии дополнительной движущей силы, вследствие действия которой вещество макроспикул достигает больших высот, чем те, которые соответствовали бы их начальным скоростям. Было также показано, что ускорение макроспикул слабо зависит от их наклона, что, в совокупности, позволяет заключить, что движение макроспикул не является чисто баллистическим.

Вместе с тем, была обнаружена сильная линейная зависимость меж-

ду начальной скоростью движения макроспикул и их ускорением (рис. 6). Известно, что подобное поведение хорошо согласуется с моделью магнито-звуковых ударных волн (п. 4.3.5), которая ранее была успешно применена для описания схожих особенностей движения хромосферных джетов, таких как спикеры, динамические фибриллы и хромосферные узелки [26–28]. В данной модели движение вещества макроспикулы соответствует линейному изменению скорости между двумя соседними фронтами периодической ударной волны, следствием чего является параболический профиль её движения. Дополнительной движущей силой при этом является градиент давления, возникающий за фронтом ударной волны. Согласно полученным данным, период ударных волн для макроспикул составляет 10 ± 2 мин, в то время как для спикеров и иных хромосферных джетов характерны значения около 1–2 мин, что говорит о вероятно ином источнике ударных волн, участвующих в формировании макроспикул.

В заключении суммируются следующие основные результаты, полученные в ходе работы над диссертацией:

- исследован ансамбль спокойных и спокойно-эруптивных протуберанцев в минимуме цикла солнечной активности; получены распределения основных пространственных и динамических характеристик протуберанцев; даны оценки суммарной массы и гравитационной энергии, одновременно содержащихся в протуберанцах исследованного масштаба; получен спектр гравитационной энергии протуберанцев; показан существенный вклад протуберанцев малого масштаба;
- изучена динамика макроспикул по данным наблюдений с рекордным для ВУФ диапазоном временным разрешением; восстановлена эволюция поля продольных скоростей макроспикул; показано близкое соответствие динамики макроспикул на всех высотах и параболических профилей движения их вершин; получена оценка рассеиваемого в короне видимого вещества макроспикул; показан существенный вклад макроспикул в баланс массы короны Солнца и солнечного ветра;
- исследован ансамбль макроспикул в корональных дырах и областях спокойного Солнца; получены распределения основных пространствен-

ных и динамических характеристик макроспикул и исследованы их взаимные корреляции; на основе анализа полученных данных показан небаллистический характер движения макроспикул, а также установлен вероятный механизм их движения, обусловленный прохождением магнитозвуковой ударной волны;

после чего обсуждается значимость полученных результатов в контексте дальнейших исследований по рассматриваемой тематике.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

a.e.	астрономическая единица
ВУФ	вакуумный ультрафиолет
КВМ	корональный выброс массы
КОРОНАС	Комплексные Орбитальные Околосолнечные Наблюдения Активности Солнца
AIA	Atmospheric Imaging Assembly (Комплекс для изображения атмосферы)
EIT	Extreme ultraviolet Imaging Telescope (Телескоп для получения изображений в вакуумном ультрафиолете)
EUVI	Extreme UltraViolet Imager (Устройство для получения изображений в вакуумном ультрафиолете)
Hi-C	High Resolution Coronal Imager (Устройство для получения изображений короны высокого разрешения)
SOHO	Solar and Heliospheric Observatory (Обсерватория по изучению Солнца и гелиосферы)
SDO	Solar Dynamics Observatory (Обсерватория по изучению солнечной динамики)
STEREO	Solar TERrestrial RELations Observatory (Обсерватория по изучению солнечно-земных связей)
TRACE	Transition Region and Coronal Explorer (Космический аппарат для исследования переходного слоя и короны)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kankare E., Kotak R., Mattila S., [et al.]*. A population of highly energetic transient events in the centres of active galaxies // *Nature Astronomy*. — 2017. — Nov. — Vol. 1. — P. 865–871.
2. *Yalinewich A., Matzner C. D.* Optical transient from an explosion close to the stellar surface // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2019. — Nov. — Vol. 490, no. 1. — P. 312–318.
3. *Physics of the Sun. Volume I: The Solar Interior. Vol. 24 / ed. by P. A. Sturrock, T. E. Holzer, D. M. Mihalas, R. K. Ulrich*. — Reidel, 1986. — (Geophysics and astrophysics monographs).
4. *Physics of the Sun. Volume II: The Solar Atmosphere. Vol. 25 / ed. by P. A. Sturrock, T. E. Holzer, D. M. Mihalas, R. K. Ulrich*. — Reidel, 1986. — (Geophysics and Astrophysics Monographs).
5. *Aschwanden M. J.* *Physics of the Solar Corona: An Introduction with Problems and Solutions*. — Springer, 2006. — (Springer Praxis Books in Astronomy and Planetary Sciences).
6. *Athay R. G.* *The Solar Chromosphere and Corona: Quiet Sun. Vol. 53*. — Dordrecht, Holland : Reidel, 1976. — (Astrophysics and Space Science Library).
7. *Cranmer S. R.* *Coronal Heating Versus Solar Wind Acceleration // SOHO 15 Coronal Heating. Vol. 575 / ed. by R. W. Walsh, J. Ireland, D. Danesy, B. Fleck*. — 12/2004. — P. 154. — (ESA Special Publication).
8. *The Origin and Dynamics of Solar Magnetism. Vol. 32 / ed. by M. J. Thompson, A. Balogh, J. L. Culhane, / Nordlund, S. K. Solanki, J.-P. Zahn*. — Springer, 2009. — (Space Sciences Series of ISSI).
9. *Solar Dynamics and Magnetism from the Interior to the Atmosphere / ed. by N. N. Mansour, A. G. Kosovichev, R. Komm, D. Longcope*. — Springer, 2014.
10. *Zirker J. B.* *Coronal holes and high-speed wind streams // Reviews of Geophysics and Space Physics*. — 1977. — Aug. — Vol. 15. — P. 257–269.

11. *de Pontieu B., McIntosh S. W., Carlsson M., [et al.]*. The Origins of Hot Plasma in the Solar Corona // *Science*. — 2011. — Jan. — Vol. 331, no. 6013. — P. 55–58.
12. *Doyle J. G., Madjarska M. S.* Solar Transient Events and their Importance for Coronal Heating // *Science Progress*. — 2004. — Vol. 87, no. 2. — P. 101–130.
13. *Beckers J. M.* Solar Spicules // *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*. — 1972. — Vol. 10. — P. 73–100.
14. *Withbroe G. L.* The role of spicules in heating the solar atmosphere: Implications of EUV observations // *The Astrophysical Journal*. — 1983. — Apr. — Vol. 267. — P. 825–836.
15. *Bohlin J. D., Vogel S. N., Purcell J. D., Sheeley Jr. N. R., Tousey R., Vanhoosier M. E.* A newly observed solar feature: Macrospicules in He II 304 Å // *The Astrophysical Journal Letters*. — 1975. — May. — Vol. 197. — P. L133–L135.
16. *Withbroe G. L., Jaffe D. T., Foukal P. V., [et al.]*. Extreme-ultraviolet transients observed at the solar pole // *The Astrophysical Journal*. — 1976. — Jan. — Vol. 203. — P. 528–532.
17. *Loucif M. L.* Giant macrospicules as possible sources of the fast solar wind // *Astronomy & Astrophysics*. — 1994. — Jan. — Vol. 281. — P. 95–107.
18. *Bennett S. M., Erdélyi R.* On the Statistics of Macrospicules // *The Astrophysical Journal*. — 2015. — Aug. — Vol. 808. — 135 (9 pp.)
19. *Kiss T. S., Gyenge N., Erdélyi R.* Systematic Variations of Macrospicule Properties Observed by SDO/AIA over Half a Decade // *The Astrophysical Journal*. — 2017. — Jan. — Vol. 835. — 47 (10 pp.)
20. *Tandberg-Hanssen E.* The Nature of Solar Prominences. Vol. 199. — Kluwer Academic Publishers, 1995. — (Astrophysics and Space Science Library).
21. *Lin J., Soon W., Baliunas S. L.* Theories of Solar Eruptions: a Review // *New Astronomy Review*. — 2003. — Apr. — Vol. 47. — P. 53–84.

22. *Gopalswamy N., Shimojo M., Lu W., Yashiro S., Shibasaki K., Howard R. A.* Prominence Eruptions and Coronal Mass Ejection: A Statistical Study Using Microwave Observations // *The Astrophysical Journal*. — 2003. — Mar. — Vol. 586. — P. 562–578.
23. *Lang K. R.* *The Sun from Space*. — Second edition. — Springer, 2009.
24. *Kuzin S. V., Bogachev S. A., Zhitnik I. A., [et al.]*. TESIS Experiment on EUV Imaging Spectroscopy of the Sun // *Advances in Space Research*. — 2009. — Mar. — Vol. 43. — P. 1001–1006.
25. *Lemen J. R., Title A. M., Akin D. J., [et al.]*. The Atmospheric Imaging Assembly (AIA) on the Solar Dynamics Observatory (SDO) // *Solar Physics*. — 2012. — Jan. — Vol. 275. — P. 17–40.
26. *Hansteen V. H., De Pontieu B., Rouppe van der Voort L., van Noort M., Carlsson M.* Dynamic Fibrils Are Driven by Magnetoacoustic Shocks // *The Astrophysical Journal Letters*. — 2006. — Aug. — Vol. 647. — P. L73–L76.
27. *Rouppe van der Voort L. H. M., De Pontieu B., Hansteen V. H., Carlsson M., van Noort M.* Magnetoacoustic Shocks as a Driver of Quiet-Sun Mottles // *The Astrophysical Journal Letters*. — 2007. — May. — Vol. 660. — P. L169–L172.
28. *de Pontieu B., McIntosh S., Hansteen V. H., [et al.]*. A Tale of Two Spicules: The Impact of Spicules on the Magnetic Chromosphere // *Publications of the Astronomical Society of Japan*. — 2007. — Nov. — Vol. 59. — S655–S662.