

Лобода Иван Петрович

Мелкомасштабные транзиентные явления в нижней короне Солнца

Специальность 01.03.02 – «астрофизика и звездная астрономия»

Диссертация на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук

Научный руководитель
д.ф.-м.н. **Богачёв С.А.**

Актуальность темы

2

Атмосфера Солнца разделяется на фотосферу, хромосферу, переходный слой и корону.

В переходном слое происходит рост температуры и падение плотности вещества на 2 порядка величины.

В настоящее время отсутствует детальное понимание механизмов переноса массы и энергии, ответственных за формирование горячей короны у Солнца и звёзд солнечного типа.

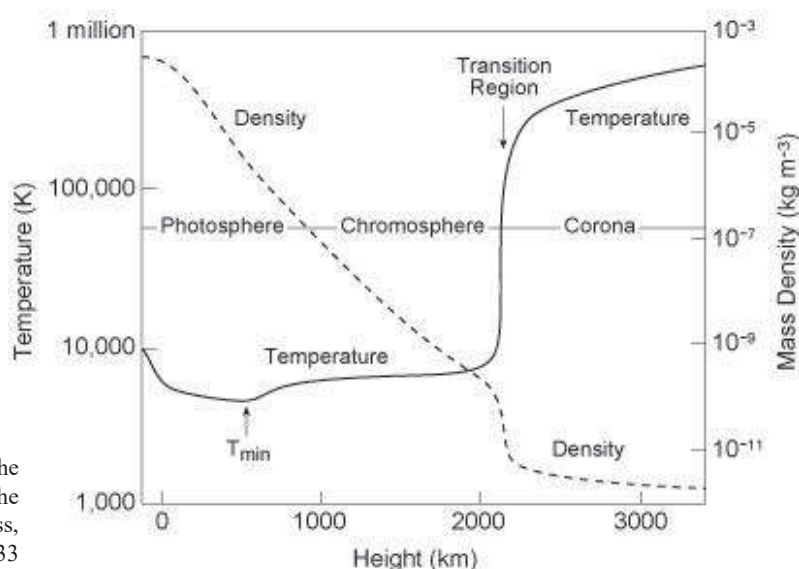


Иллюстрация: Lang K. R. The Cambridge Encyclopedia of the Sun – Cambridge University Press, 2001. – ISBN 978-0521780933

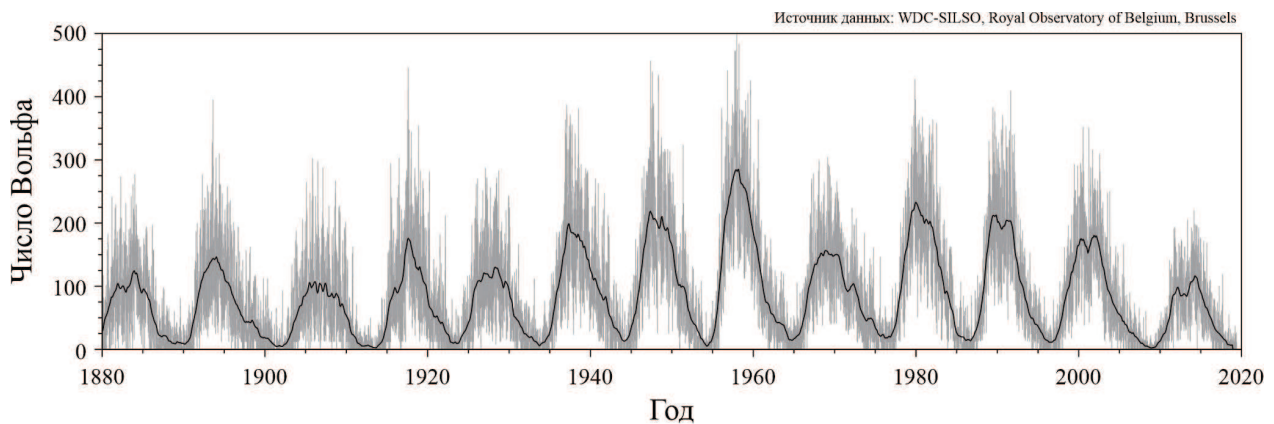
Актуальность темы

3

Крупномасштабная активность является циклической, при этом состояние невозмущённой короны слабо зависит от фазы цикла активности.

В связи с этим, предполагается существенная роль мелкомасштабных активных явлений в балансе массы и энергии солнечной короны.

Крупномасштабная активность сконцентрирована в активных областях Солнца. Помимо этого, выделяют области спокойного Солнца и корональные дыры



Актуальность темы

4

Можно выделить два основных класса мелкомасштабных транзитных явлений в нижней короне: солнечные джеты и протуберанцы среднего и малого размера.

Наиболее изучены хромосферные джеты – спиккулы, однако показано, что они не обеспечивают достаточный приток горячей ($T \geq 5 \times 10^5$ К) плазмы в корону.



Данные наблюдений телескопа Грегори в крыльях линии H α ,
© K.G. Puschmann

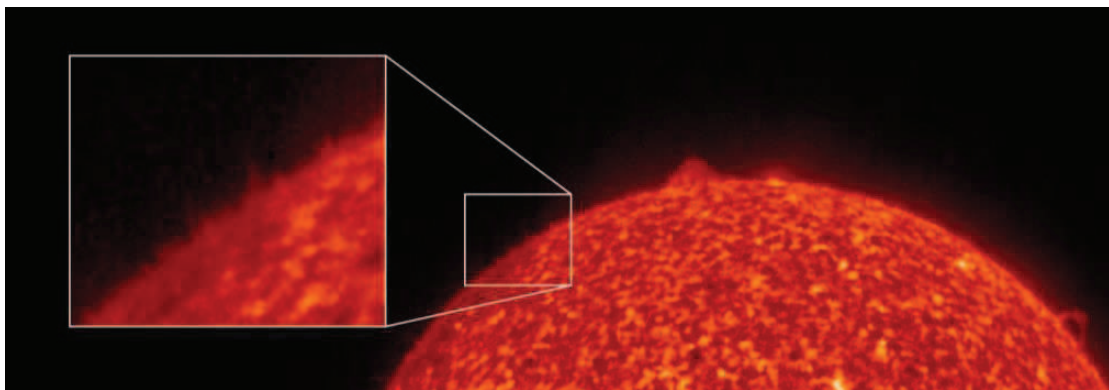
Актуальность темы

5

Макроспикулы структурно схожи со спикулами, однако обладают большими размерами и скоростями движения.

Макроспикулы наблюдаются преимущественно в корональных дырах в линиях переходного слоя.

Предполагается существенная роль макроспикул в формировании быстрой компоненты солнечного ветра.



Актуальность темы

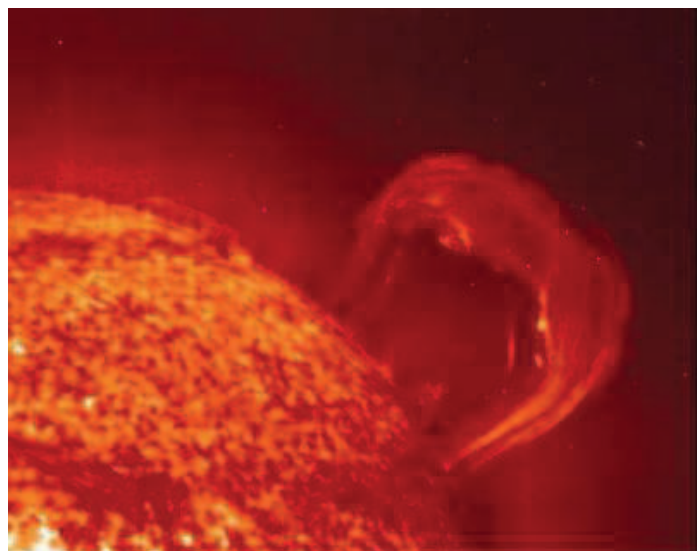
6

Протуберанцы – холодные и плотные образования, удерживаемые магнитным полем над поверхностью Солнца.

Неустойчивость магнитной структуры приводит к эрупции вещества протуберанцев и формированию корональных выбросов массы — спорадической компоненты солнечного ветра.

В настоящий момент изучены в основном крупные, единичные события, наиболее доступные для наблюдения.

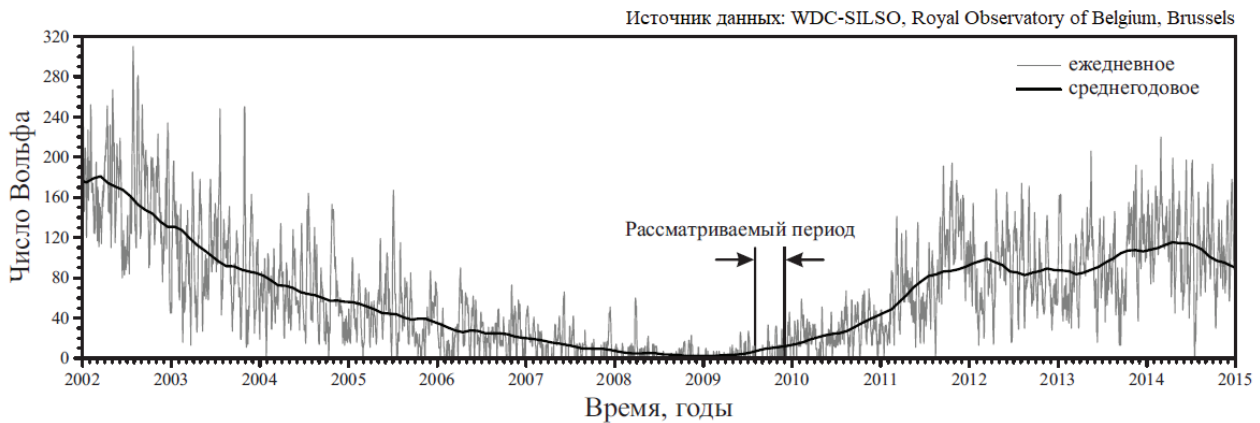
Протуберанцы малого размера остаются малоизученными.



Изображение EIT/SOHO (ЕКА) в линии He II 304 Å

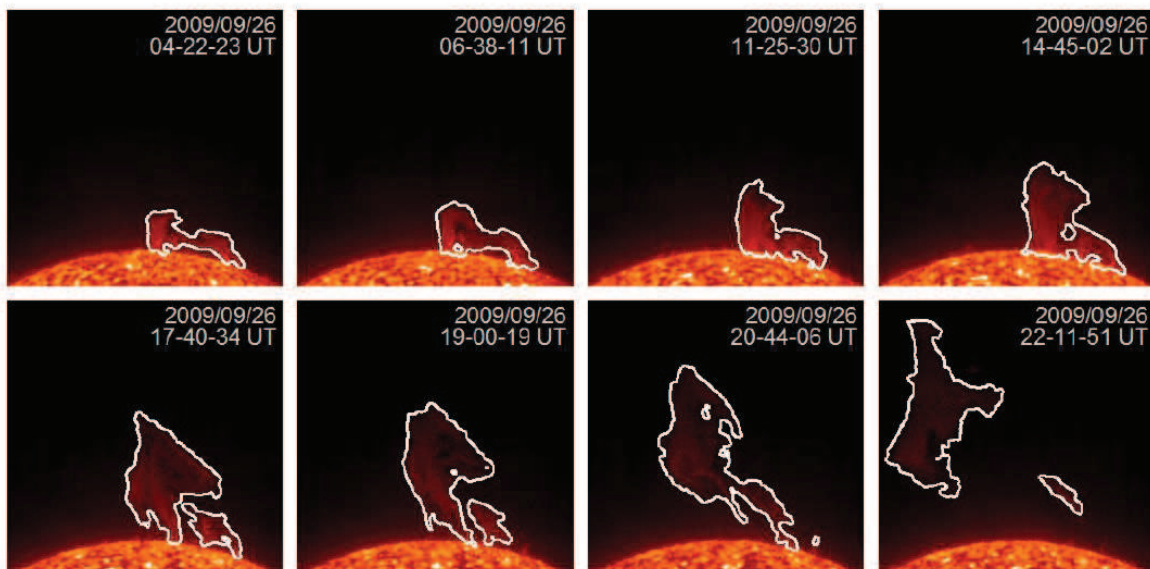
Исследование ансамбля протуберанцев

- Использованы данные наблюдений обсерватории ТЕСИС (КОРОНАС-Фотон) в канале 304 Å.
- Угловое (1.7') и временное (4 мин) разрешение достаточно для исследования в том числе мелкомасштабных протуберанцев.
- Рассмотрен период с августа по ноябрь 2009 г., соответствующий окончанию продолжительного минимума солнечной активности между 23 и 24 циклами.



Исследование ансамбля протуберанцев

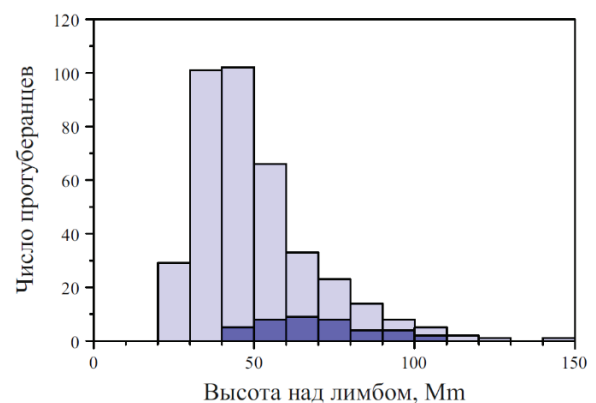
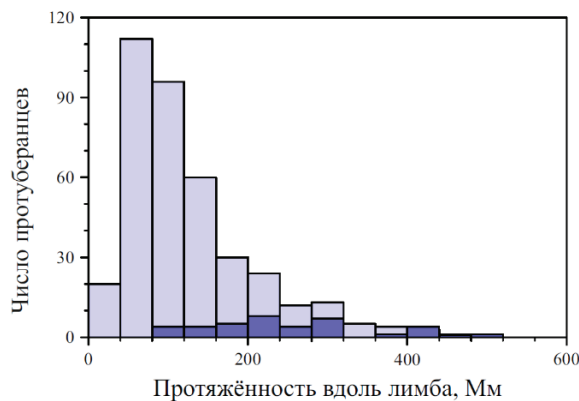
Был разработан алгоритм автоматического детектирования протуберанцев, обеспечивающий широкий динамический диапазон и надёжное определение границ протуберанцев.



Исследование ансамбля протуберанцев

В рассмотренный период зарегистрировано 348 спокойных и 41 спокойно-эруптивный протуберанец.

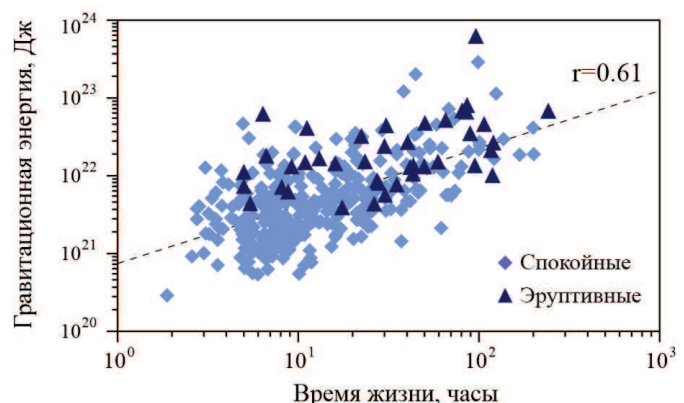
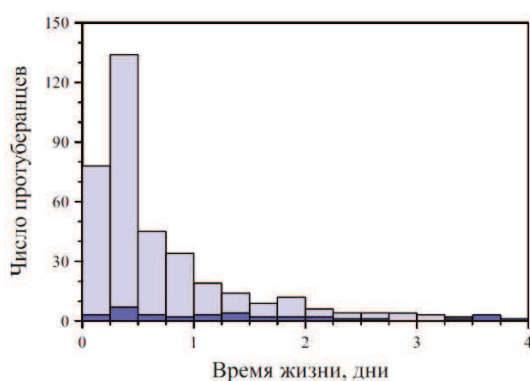
Размеры детектированных протуберанцев находятся в диапазоне от 25×25 до 150×500 Мм², причём для 50% протуберанцев характерный размер не превышает $0,1 R_{\odot}$, что свидетельствует о том, что были изучены преимущественно мелкомасштабные события.



Исследование ансамбля протуберанцев

Время жизни 75% протуберанцев не превышает 24 часов и не ограничивается вращением Солнца, при этом существует корреляция между временем жизни и масштабом протуберанца

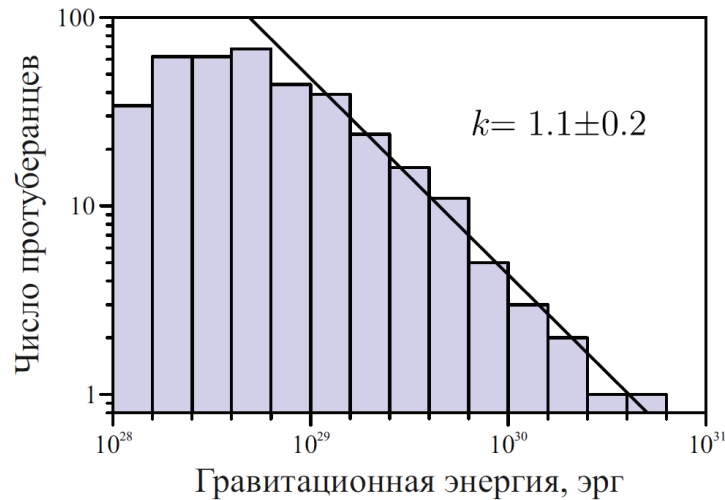
Большинство протуберанцев – стационарные структуры со средней скоростью движения 3 км/с, причём эруптивные протуберанцы находятся в числе наиболее крупных



Исследование ансамбля протуберанцев

Суммарная масса одновременно существующих на всём Солнце протуберанцев оценивается как $10^{15} - 10^{17}$ г, суммарная гравитационная энергия – от 10^{29} до 10^{31} эрг.

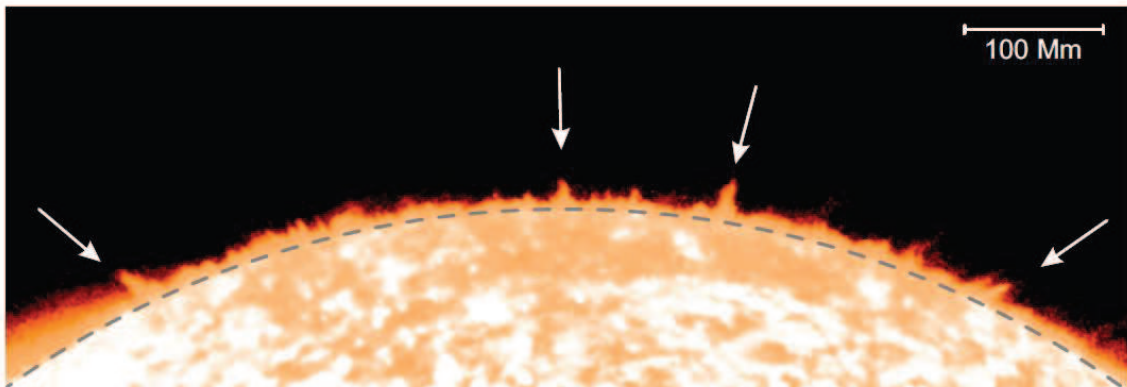
Спектр гравитационной энергии в диапазоне свыше 4×10^{28} эрг является степенным с показателем -1.1 ± 0.2 , что говорит о близости распределения к равномерному.



Исследование динамики макроспикул

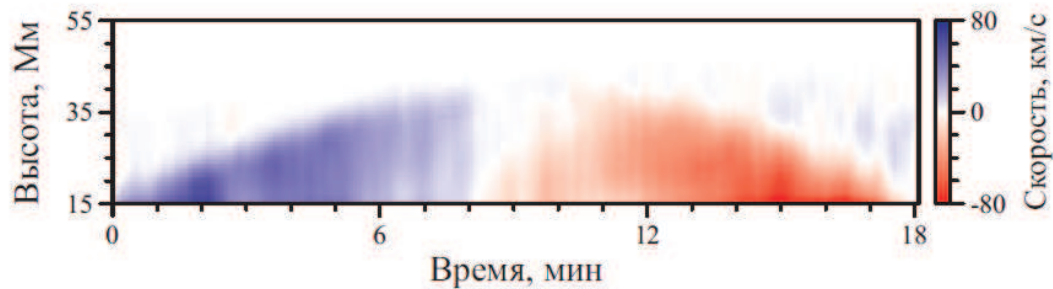
Использованы серии изображений ТЕСИС в канале 304 \AA с рекордным для ВУФ диапазона временным разрешением $3.5 - 6.0$ с.

Для достижения высокого временного разрешения область наблюдений была ограничена приполярными областями Солнца.



Исследование динамики макроспикул

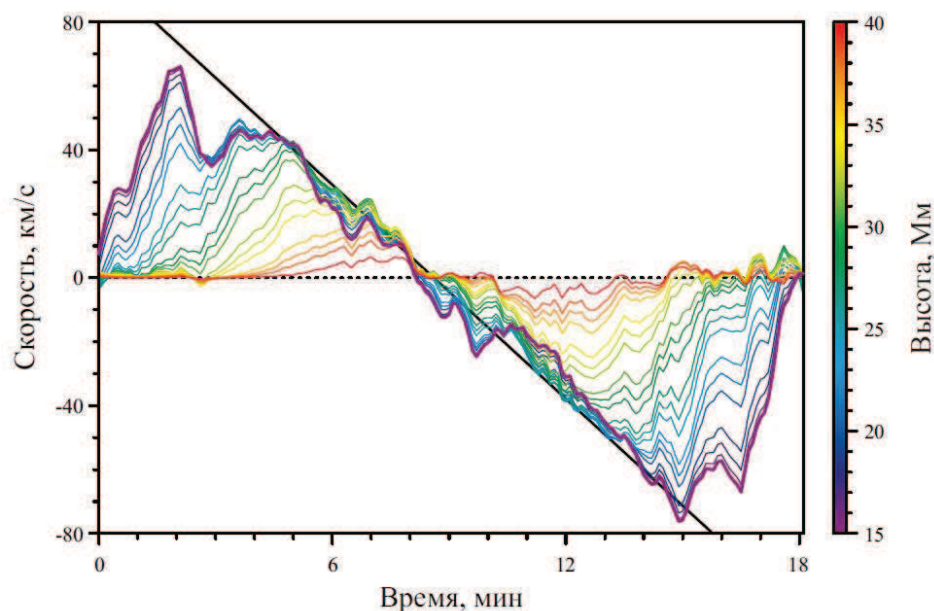
Была восстановлена эволюция продольного поля скоростей для 18 макроспикул.



Полученные поля скоростей были сопоставлены с профилями движения верхних точек макроспикул, в большинстве случаев (15 макроспикул) являвшихся параболическими.

Исследование динамики макроспикул

Показано, что профили скорости имеют схожий характер на различных высотах и близко соответствуют параболическому профилю движения верхней точки макроспикулы.



Исследование динамики макроспикул

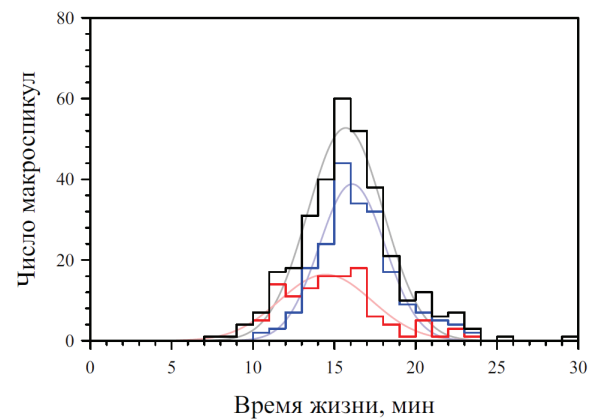
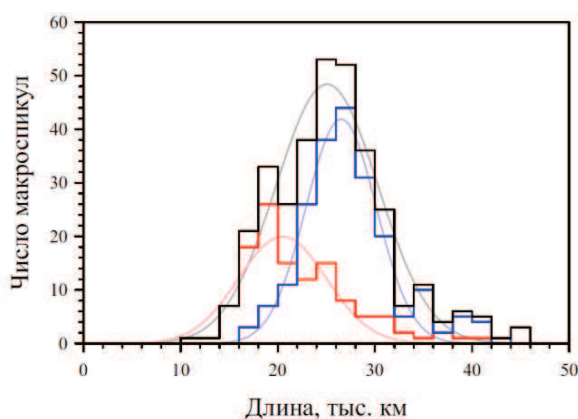
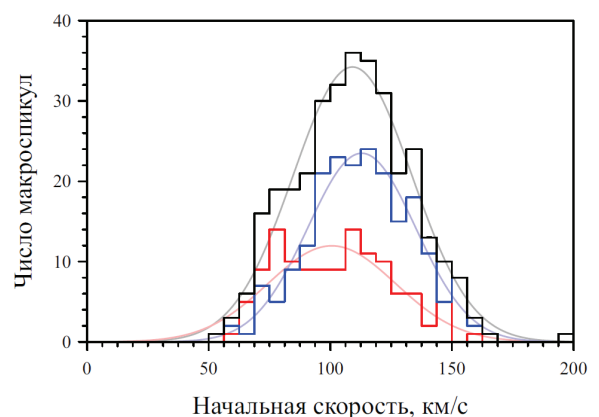
В предположении, что движение вещества макроспикулы по всей длине совпадает с движением её верхней точки, были получены оценки доли потерь вещества в макроспикулах.

Потери составляют 10–30 % видимой массы макроспикулы (в отдельных случаях — до 80%), что соответствует суммарному потоку вещества порядка 10^{11} г/с, или 5–10 % от полного потока солнечного ветра.

Исследование ансамбля макроспикул

Использованы данные SDO в канале 304 \AA , угловое разрешение $0.6''$, временное – 12 с. Рассмотрен период с июня 2010 г. по июнь 2015 г., общее время наблюдения – 90 часов.

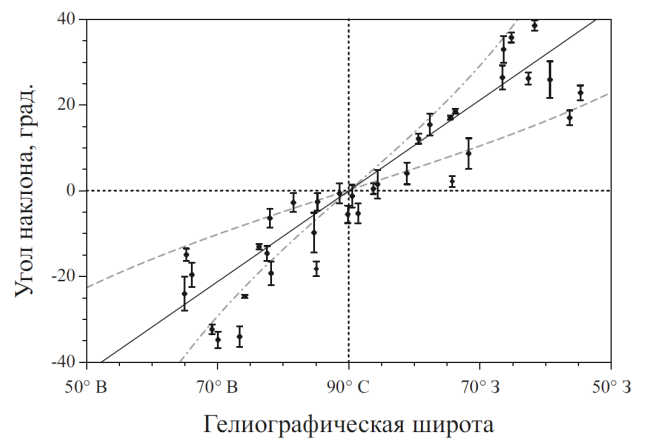
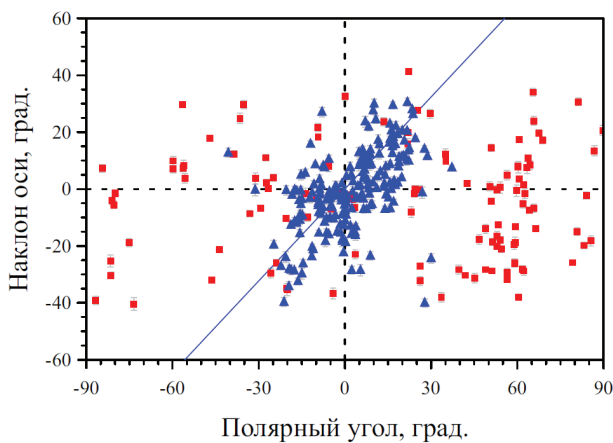
Исследовано 330 макроспикул, измерены их основные динамические характеристики.



Исследование ансамбля макроспикул

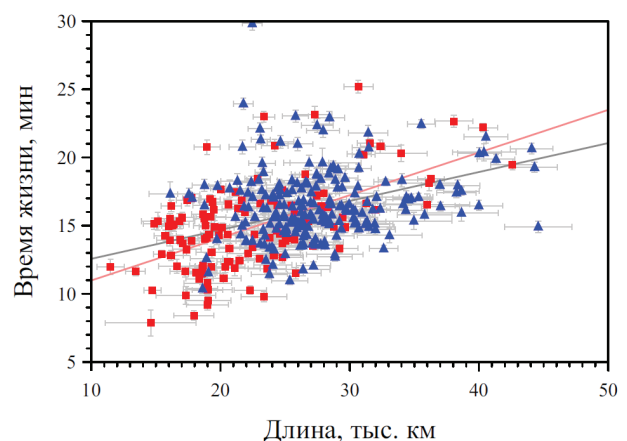
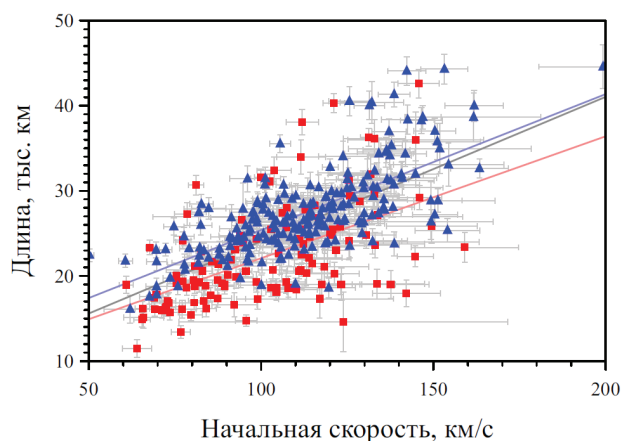
Для макроспикул в корональных дырах наблюдается умеренная ($r \sim 0,5$) корреляция между угловым расстоянием до полюса и углом наклона её оси, отвечающая структуре глобального магнитного поля Солнца.

Это подтверждает существующее представление о том, что движение макроспикул, в целом, сонаправлено линиям магнитного поля.



Исследование ансамбля макроспикул

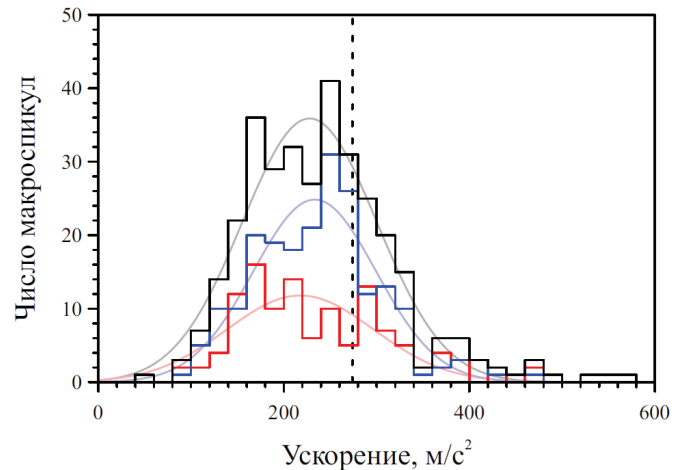
Также обнаруживаются естественные для равноускоренного движения зависимости между начальной скоростью, временем жизни и высотой подъёма макроспикул, однако они не являются выраженными ($r \sim 0,5$).



Исследование ансамбля макроспикул

Движение макроспикул не является свободным (баллистическим):

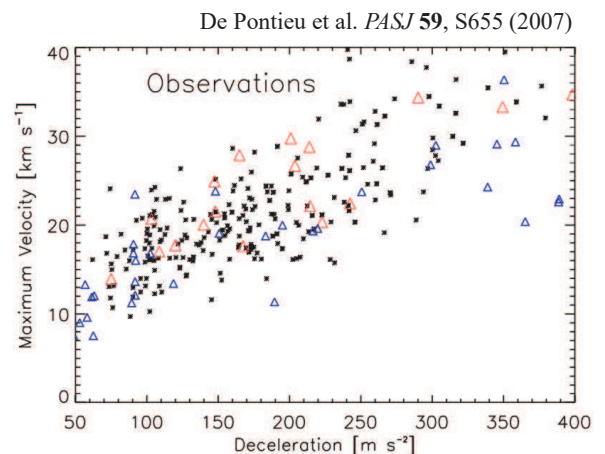
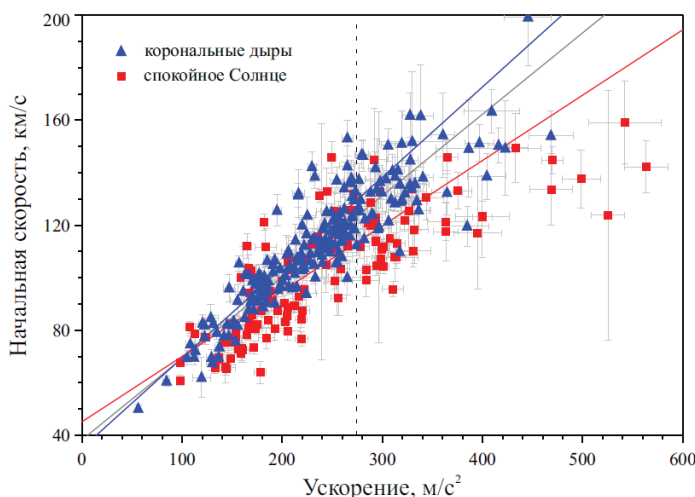
- Значительная доля макроспикул (35%) имеет ускорения, превышающие ускорение свободного падения
- Не обнаруживается даже слабой зависимости ускорения от видимого угла наклона макроспикулы
- Наблюдаемые углы наклона макроспикул не достаточны, чтобы объяснить наименьшие из полученных ускорений



Исследование ансамбля макроспикул

Обнаруживается сильная ($r \geq 0,8$) корреляция между начальной скоростью макроспикул и их ускорением

Подобная зависимость наблюдалась ранее для нескольких классов хромосферных джетов: спикул, динамических фибрилл и хромосферных узелков

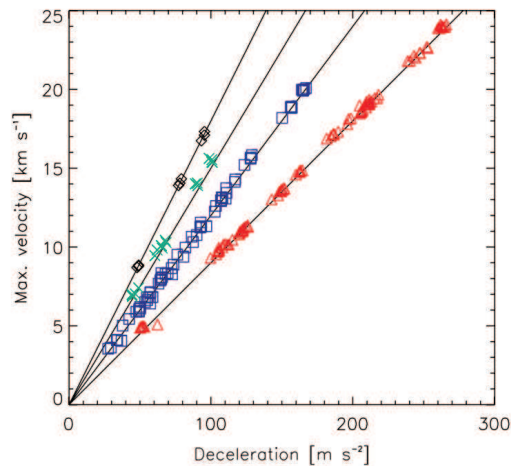
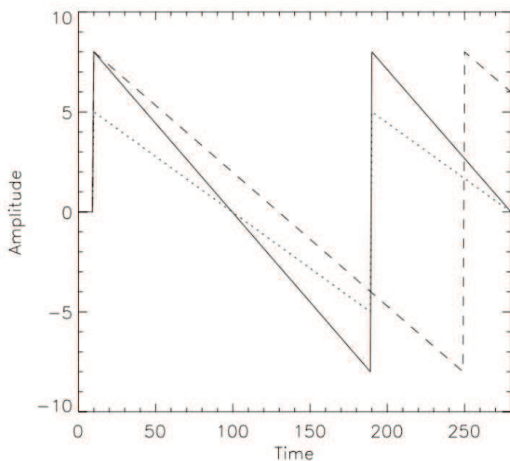


Исследование ансамбля макроспикул

Для этих джетов была предложена модель ускорения вещества макроспикулы периодической ударной волной.

Линейное изменение скорости за фронтом ударной волны отвечает наблюдаемым параболическим профилям движения.

Период волны P , ускорение a и начальная скорость v_0 в этой модели связаны соотношением $v_0 = \frac{P}{2} a$.



Иллюстрации:
Heggland et al.
ApJ 666, 1277
(2007)

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 %, что 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.

- I. P. Loboda, S. A. Bogachev, “Quiescent and Eruptive Prominences at Solar Minimum: a Statistical Study via an Automated Tracking System”, *Solar Physics* **290**, 1963 (2015)
- I. P. Loboda, S. A. Bogachev, “Plasma dynamics in solar macrospicules from high-cadence Extreme-UV observations”, *Astronomy & Astrophysics* **597**, A78 (2017)
- I. P. Loboda, S. A. Bogachev, “What is a macrospicule?”, *The Astrophysical Journal* **871**, 230 (2019)

Прочие публикации по теме диссертации

- I. P. Loboda, S. A. Bogachev, “Velocity field and loss of mass in solar macrospicules from high-cadence observations in the He II 304 Å spectral line”, *Physics Procedia* **74C**, 328 (2015)
- I.P. Loboda, S.A. Bogachev, “A statistical study of linear jets in the low solar corona”, *Astronomical and Astrophysical Transactions* **31-2**, 199 (2019)

Тезисы докладов

- 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*, стр. 97 (2012)
- 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*, p. 52 (2014)
- 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*, стр. 147 (2015)
- 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, стр. 49 (2015)
- Loboda I., “Dynamics of solar macrospicules from high-cadence EUV observations”, *Hinode 9 abstracts*, p. 173 (2015)
- Loboda I., “Variations of the EUV jets’ properties”, *Abstracts 2017 Hinode/IRIS Meeting*, p. 41 (2017)
- Лобода И. П., «Статистическое исследование линейных джетов в нижней короне Солнца», *Магнетизм, циклы активности и вспышки на Солнце и звёздах. Сборник тезисов*, стр. 31 (2018)

Спасибо за внимание!