

Институт по астрономия
с Национална астрономическа обсерватория,
Българска академия на науките



Изследване на дестабилизацията и ерупцията на протуберанси/влакна в активни области на Слънцето

Автореферат на дисертация за получаване на научна и
образователна степен „Доктор” по професионално направление
4.1 Физически науки, научна специалност „Хелиофизика” на

Цветан Ангелов Цветков

Научен ръководител:
проф. д-р Евгени Семков
Научен консултант:
гл. ас. д-р Никола Петров

София, 2019 г.

Използвани съкращения

а. ед. – астрономическа единица
АО – Активна област
АП – Активен протуберанс
ЕП – Еруптивен протуберанс
ЗРАСРБ – Закон за развитие на академичния състав в Република България
ИКМ – Изхвърляне на коронална маса (СМЕ, англ.)
МП – Магнитно поле
МИЛ – Магнитна инверсна линия
ПАО – Протуберанс в активна област
ПМАО – Протуберанс между активни области
ПСЗ – Пълно слънчево затъмнение
ПСО – Протуберанс в спокойна област
ПП – Полярен протуберанс
ПШ – Полярни ширини
СП – Спокоен протуберанс
СШ – Средни ширини
AIA – Atmospheric Imaging Assembly
EUVI – Extreme Ultraviolet Imager
GOES – Geostationary Operational Environmental Satellites
LASCO – Large Angle and Spectrometric Coronagraph
SDO – Solar Dynamics Observatory
SECCHI – Sun Earth Connection Coronal and Heliospheric Investigation
SOHO – Solar & Heliospheric Observatory
STEREO – Solar TERrestrial RELations Observatory
UT – Universal Time

Съдържание

Увод	iv
1 Слънчеви протуберанси	1
1.1 Спокойни и активни протуберанси	1
1.1.1 Основни характеристики	1
1.1.2 Обкръжение на СП	3
1.1.3 Дестабилизация	5
2 Еруптивни протуберанси	6
2.1 Видове еруптивни протуберанси	6
2.2 Видове ерупции на протуберанси	7
2.3 Развитие на еруптивен процес	8
2.4 Връзка с други прояви на слънчева активност	9
3 Осцилации на скоростите на еруптивни протуберанси	10
3.1 Наблюдателни данни	10
3.2 Обработка и анализ	11
3.3 Резултати	13
3.4 Дискусия	20
3.5 Наблюдения на протуберанси по време на пълно слънчево затъмнение	23
3.5.1 Основни данни за затъмнението от 21 август 2017 г.	23
3.5.2 Локация на екипа	23
3.5.3 Проведени експерименти и резултати	23

4	Връзка между протуберанси и потоци заредени частици	27
4.1	Селекция на събитията	27
4.2	Наблюдения на асоциирани протуберанси	28
4.3	Статистически резултати	28
4.3.1	Корелационен анализ на връзката на заредени частици с протуберанси	28
4.3.2	Корелационен анализ на връзката на еруптивни протуберанси със заредени частици	30
5	Заключение	32
5.1	Основни резултати и изводи	32
5.2	Основни публикации	35
5.3	Други публикации	36
5.4	Участия в научни форуми	36
5.5	Минимални национални изисквания	40
5.6	Благодарности	41

Увод

В силно разредената и гореща слънчева корона съществуват относително плътни и хладни образувания – слънчевите протуберанси. Техните размери, форма, поведение, време на живот и еволюция са многообразни и се определят от различните форми на взаимодействие на слънчевата плазма с обкръжаващото магнитно поле.

Заради видимостта си по време на пълни слънчеви затъмнения протуберансите са известни на хората от векове. Въпреки това едва през последните няколко десетилетия е осъзнат и техният принос във взаимодействието между Слънцето и Земята. Днес знаем, че еруптивните структури в ниските слоеве на слънчевата атмосфера имат определяща роля в генерирането на космическото време.

Начините за наблюдението им се променят, преминавайки през различни етапи – визуални наблюдения, фотографски методи, спектрохелиографи и коронографи. Развитieto на техниките за изследване води до началото на космическите наблюдения от последните няколко десетилетия, които имат редица предимства като регулярност, непрекъснатост, високо времево и пространствено разрешение. Усъвършенстването на технологиите за наблюдение на Слънцето, възможностите за постоянен и детайлен мониторинг на неговата активност ни позволяват да доразвием и представите си за различните активни процеси в слънчевата атмосфера и връзките помежду им.

Темата на тази работа е насочена към съвременните проблеми при изучаването на протуберансите. Редица все още дискуссионни въпроси, свързани с физиката на Слънцето, са представени като актуални научни проблеми или като част от авторските резултати.

Глава 1

Слънчеви протуберанси

Слънчевите протуберанси са относително студени ($T = 10^4$ К) и плътни ($n_e = 10^{10} - 10^{11} \text{ cm}^{-3}$) образувания, разположени в слънчевата корона, където $n_e = 10^8 - 10^9 \text{ cm}^{-3}$ и $T = 10^6$ К [48]. Могат да бъдат наблюдавани в емисия като образувания над лимба (протуберанси) или в абсорбция върху диска на Слънцето (vlakna). Въпреки разликата в наименованията те се отнасят за едно и също физическо явление, като различният термин обозначава единствено мястото, където е наблюдавано то. Затова в настоящата дисертация и двата термина ще бъдат употребявани като взаимозаменяеми.

Въпреки различните класификации най-широко употребявано до днес е разделянето на протуберансите на *спокойни* (СП) и *активни* (АП), като към тези два основни типа се добави и междинен клас – *смесен тип протуберанси*, чието съществуване преминава през етапи на спокойно и активно състояние [49].

1.1 Спокойни и активни протуберанси

1.1.1 Основни характеристики

Спокойните протуберанси са относително стабилни образувания, които се разполагат извън активни области. Наброяват около 2/3 от всички слънчеви протуберанси. Техните глобални характеристики не показват относително големи изменения за дълги периоди от време

(до няколко слънчеви ротации), но наблюдения с висока разделителна способност показват, че на ниво фина структура те са динамични образувания, показващи редица процеси на промяна.

Активните протуберанси се локализируют в или в околност на активни области и обикновено се асоциират със слънчеви избухвания. Те са динамични структури с ясно изразени движения и с време на живот до няколко часа [3].

Смесеният тип протуберанси представляват междинен клас. Наблюдават се най-вече между или в затихващи активни области (АО). Често част от влакното има поведение на СП, а друга – на АП [49].

Влакната като трасери на магнитното поле

Протуберансите се разполагат по магнитните инверсни линии (МИЛ) – границата на области с противоположна магнитна полярност във фотосферата, където магнитното поле (МП) е хоризонтално [2]. Тези линии съвпадат с т.нар. канали на влакната [3]. Според съвременните представи съществуват 4 категории МИЛ, които дефинират вида на образуванията върху тях влакна [33]:

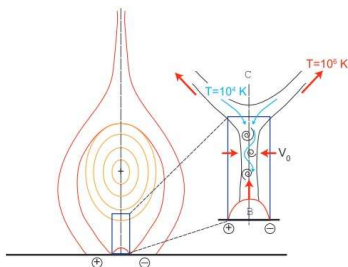
- Влакно в биполярна активна област – разполага се по МИЛ, които разделят две противоположни магнитни полярности в една и съща активна област.
- Влакно между биполярни активни области – разполага се по МИЛ, които разделят две съседни биполярни активни области.
- Влакно от смесен тип – част от влакното се намира върху вътрешна МИЛ в биполярна активна област, а останалата част – по МИЛ извън нея.
- Влакно в дифузна биполярна магнитна област – конфигурация, характерна за полярни протуберанси. Разпределянето на полярностите от двете страни на дифузна биполярна област е резултат от появата, смесването и изчезването на много магнитни потоци, което усложнява конфигурацията и я отличава от останалите типове.

Фактът, че протуберансите се формират на всички хелиографски ширини, ги прави много удобни за проследяването и изучаването

на структурата и еволюцията на едромашабното магнитно поле на Слънцето.

1.1.2 Обкръжение на СП

Спокойните протуберанси се разполагат върху *канални* (структури, наблюдавани в рентгеновата област, които съвпадат с положението на МИЛ) в основата на *шлемовидни стримери* (Фигура 1.1) – големи, ярки, сравнително радиални структури с по-висока плътност от околната коронална среда. Често се разполагат на ширини около и над 50° , имат характерен диаметър $\sim 300\,000\text{ km}$ ($\approx 0.45R_\odot$) и височина $0.5 - 10R_\odot$. По време на ПСЗ се наблюдават в бяла светлина (Фигура 1.2).



Фигура 1.1: Типично обкръжение на спокоен протуберанс (син контур) в основата на коронален стример (червен контур) с коронална кухина помежду им (златист контур) [9].

В пространството между протуберанса и арките на стримера, в неговата основа се намира по-тъмната и по-малко плътна най-вътрешна част на шлема – *коронална кухина* (Фигура 1.1) – големи области, които могат да се наблюдават в бяла светлина по време на пълни слънчеви затъмнения (ПСЗ) или на изображения на короната в EUV, обикновено на ширини над 40° . По-тъмни са, тъй като имат 30–40% по-ниска плътност спрямо околността, а температурата им е съизмерима с тази на обкръжението [4]. Размерите им (височина и ширина) са приблизително два пъти по-големи от тези на СП [51].



Фигура 1.2: Шлемовидни стримери, заснети по време на наблюдение на ПСЗ от 21 август 2017 г. Изображението е сбор от различни експозиции с повишена яркост, поради което трудно се забелязват протуберансите в основата на стримерите.

Връзката между протуберансите и кухините се основава на идеята за формиране на протуберанси чрез коронална кондензация: гореща плазма, която се охлажда в областта на кухината над протуберанса, играе ролята на източник на слабо йонизирана плазма в СП (Фигура 1.1). Наблюденията на кухини, които не съдържат протуберанси, се обясняват чрез недостатъчно количество плазма в кухината [3]. Смята се, че кухините са отговорни за около 40% от всички слънчеви ерупции, като в тях се оформя тялото на спокойните изхвърляния на коронална маса (ИКМ) [42].

Над кухините се разполагат *коронални празнини* – тънки, тъмни, подобни на лъчи структури, простиращи се в короната на разстояния до $3R_{\odot}$ от лимба. Възникват и изчезват в течение на по-малко от 4 часа, което прави времето им на живот по-късо от това на каналите на влакната и самите влакна [34].

Външната обвивка на протуберансите, където температурата на плазмата нараства до 10^5 K, плътността ѝ намаля и средата става оптически тънка, се нарича *преходна област протуберанс-корона*. Тя разделя студеното протуберансово вещество от горещата корона.

1.1.3 Дестабилизация

Неустойчивости

Част от съществуването на немалка част от протуберансите са процесите на дестабилизация и активация – преход от близко до спокойното състояние към напълно активно в рамките на няколко часа, свързано с промяна във вида и структурата на влакното [30].

Физическите механизми, които отключват дестабилизацията на протуберанси (тригери) и могат да доведат до тяхната ерупция, се разделят в 4 категории: конвергиращи движения (converging flows) [11], повърхностни (диференциално въртене) и подфотосферни движения, водещи до деформация на повърхностното поле на скоростите (shear flows) [21], поява на нов магнитен поток (flux emergence) [7] и изчезване (дифузия) на магнитен поток (flux cancellation) [36].

Предвестници и признаци на дестабилизация

Процесите, които могат да послужат като наблюдателен белег за предстояща или протичаща дестабилизация в протуберансите, се делят на предвестници (precursors) и признаци (signatures):

- Потъмняване или повишаване на яркостта на части от протуберанса или области от близката му околност в ултравиолетовата област [1], „мекия“ рентген [20] и/или в линията H_{α} [35].
- Нарастване скоростта на вътрешните движения на веществото поради нагриване на протуберансовата плазма [32].
- Разрастване на кухината над протуберанса [12].
- Стичане на протуберансово вещество към хромосферата [16].
- Зараждане или затихване на радиошумови бури в метровия диапазон [43].
- Радиоизбухвания от III-ти тип [26].

Глава 2

Еруптивни протуберанси

Еруптивните протуберанси (ЕП) се отличават с голяма радиална (хелиоцентрична) компонента на скоростта в посока обратна на повърхността на Слънцето. При тях се наблюдава откъсване от гравитационното поле на Слънцето на цялото или част от веществото, което ги съставя. В случаите, когато само част от веществото напуска Слънцето, останалата част от протуберанса или пада обратно върху повърхността му, или продължава живота си над лимба. Те могат да възникват като спокойни протуберанси или влакна в активни области, които еруптират поради развитие на неустойчивост.

ЕП са само наблюдаемата проява на процесите на ниво МП, възникващи в области от Слънцето. Смята се, че те са следствие от ерупция на едромасабна магнитна структура, тясно свързана с МИЛ на слънчевото магнитно поле [44]. Студената и плътна протуберансова плазма, намираща се в част от едромасабната магнитна система, остава „замразена“ преди и по време на ерупцията и нейното поведение се определя от поведението на силовите линии на магнитната структура.

2.1 Видове еруптивни протуберанси

Според своята геометрия и поведение на едромасабната структура по време на ерупция протуберансите се делят на симетрични и асиметрични [37]. Симетричните ЕП имат характерна арковидна форма и са

съставени от множество фини влакна, често усукани или преплетени помежду си. По време на ерупцията арката се издига и разширява, като остава видима в H_{α} почти до края на ерупцията, когато бързо избледнява и изчезва. Обикновено симетричните ЕП са разположени в долната част на едромашабна магнитна система на асоциирано с тях изхвърляне на коронална маса [45].

Асиметрините ЕП имат първоначална форма, идентична на симетричните, която при началото на ерупцията се нарушава, като единият от краката на арката се откъсва от Слънцето. Другият крак на протуберанса остава закотвен за повърхността. В хода на ерупцията тялото на протуберанса се изправя спрямо лимба, като в края ѝ то е почти перпендикулярно към него, а междуременно магнитните тръби, изграждащи арката, се разсукват. Характерна за този тип еруптивни протуберанси, е ясно изразената следеруптивна фаза, по време на която протуберансовото вещество се стича обратно към фотосферата по магнитните тръби на крака, останал закотвен за повърхността.

2.2 Видове ерупции на протуберанси

Акцентирайки не върху протуберансите, а върху самия еруптивен процес, друга наблюдателна класификация разделя ерупциите в 3 класа – пълна, частична и ограничена, според мястото на магнитното присъединяване в едромашабната магнитна система [14].

Пълна ерупция се наблюдава, когато цялата магнитна структура еруптира заедно с 90% или повече от прееруптивната маса на влакното (т.е. масата се откъсва без изтичане или връщане обратно на повърхността). Подобен тип ерупция е резултат от хоризонтално магнитно присъединяване, протичащо под или ниско в магнитната конфигурация, която поддържа протуберанса.

Ерупция на магнитната структура, при която както влакното, така и обкръжаващата го магнитна конфигурация не успеят да се откъснат от гравитационното влияние на Слънцето, се нарича ограничена. В края на ерупцията се наблюдава изтичане на вещество към повърхността по магнитните силови линии или оставане на вещество в кухините на магнитната структура, които го връщат на по-ниски височини в короната.

Частичните ерупции са по-трудни за наблюдателно определяне и се разделят на две подкатегории [14]. Единият тип частични ерупции

се получават, когато цялата магнитна структура еруптира без участието на никаква или с малка част ($< 90\%$) от прееруптивната маса на протуберанса. Останалата част или цялата маса се стича обратно към повърхността. Механизмът, отговорен за загубата на маса в този случай, е отичането по магнитните силови линии, свързани с фотосферата, което е причината да не се осъществи пълна ерупция. Наблюдава се първоначално повдигане на вещество, последвано от отичане на цялата или част от масата.

При другия тип частични ерупции само горната част на магнитната конфигурация на протуберанса еруптира заедно с едромашабното магнитно въже над нея в резултат на хоризонтално магнитно проъсединяване в магнитната конфигурация на влакното. Наблюдава се като издигане на плазмата на влакното, последвана от отичане по силовите линии на магнитното поле или връщане на веществото обратно на повърхността.

2.3 Развитие на еруптивен процес

Характерната еволюция на ерупцията на протуберанс преминава през 3 етапа: прееруптивна фаза на активиране, еруптивна фаза на бързо ускорение и еруптивна фаза с постоянна или постепенно нарастваща скорост.

Фазата на активиране се изразява в бавно издигане с почти постоянна скорост от порядъка на $1-10 \text{ km s}^{-1}$ [50]. Започва с промяна на яркостта (при протуберансите – усилване на блясъка, при влакната – потъмняване). Същинската ерупция започва с внезапно ускоряване на протуберанса при достигане на определена критична височина, съизмерима с половината на разстоянието между стъпките на влакното. Наблюдава се леко повдигане на цялата едромашабна магнитна система, придружено от смущения на равновесното състояние на магнитното тяло на протуберанса, предизвикани от появата на нов магнитен поток [45]. Възможните сценарии за финал на ерупцията след етапа на бързо ускорение са три [50]. Протуберансовата арка често продължава да се издига с постоянна скорост. Понякога веществото продължава да се ускорява до края на ерупцията, а в други случаи краят на ерупцията е белязан от фаза на движение на веществото с намаляващо ускорение.

2.4 Връзка с други прояви на слънчева активност

Ако дефинираме избухването като всяка повишена емисия в H_{α} и рентгеновата област, се оказва, че 41% от всички ерупции на протуберанси са асоциирани със слънчеви избухвания [27], като връзката е по-силна при ЕП в АО (95% от случаите), отколкото при ерупция на спокойни влакна (28%). Друго изследване, което включва дори по-голяма извадка от събития, свързва 96% от ЕП с избухвания [52].

Изхвърлянията на коронална маса (ИКМ) представляват промяна в структурата на короната, включваща поява и изхвърляне на самостоятелно ярко образуване със скорост от порядъка на $20\text{--}2500 \text{ km s}^{-1}$ [6]. Широко разпространено е схващането, че в ядрото си ИКМ съдържат протуберанс [23], въпреки че съществуват и изследвания, които оспорват това твърдение [24]. Безспорна е обаче връзката между двете явления, макар и без да има категорично мнение кое от двете явления е прогенитор на другото.

В едно от първите подробни изследвания на тази връзка (по наблюдения от космическата обсерватория Skylab) се твърди, че 70% от ИКМ, които могат да се асоциират с близка форма на активност, са свързани с ЕП или с внезапно изчезващи влакна [40]. Ако обаче потърсим връзката при ЕП, достигащи височини на $0.2R_{\odot}$, процентът скача до 100%. Нови данни подкрепят изводите, като някои стигат дори до по-големи стойности за връзката между двете явления: от изследваните ЕП, ИКМ се наблюдават в 56% [27], 80% [46] или 83% [18] от случаите. Изследване, което свързва 92% от протуберансите с ИКМ, отбелязва, че при останалите 8% от случаите се наблюдават слаби движения на вещество, ограничени от близкоразположени коронални стримери [22]. Около половината от ЕП в АО се асоциират с ИКМ [52].

От различните видове протуберанси връзката с ИКМ е най-силна при еруптивните (94%), докато при активните тази връзка е далеч по-слаба (едва 46%). Освен това при 76% от короналните изхвърляния на маса, асоциирани с ЕП, е наблюдаван протуберансов материал, а при асоциираните с активни протуберанси коронални изхвърляния – в 17% от случаите [14].

Глава 3

Осцилации на скоростите на еруптивни протуберанси

Смята се, че ерупцията не превръща протуберансите в отделен клас явления, а по-скоро се разглежда като възможен сценарий за временна или крайна фаза от еволюцията на един протуберанс. Въпреки това ролята на ЕП в изучаването на взаимодействието на магнитни структури и магнитни полета в слънчевата корона е безспорна. Изследването им не е ново направление в слънчевата физика, но големият обем и високото качество на наблюдателния материал, получен през последните десетилетия, дава възможност за проучване на незабелязани до момента детайли от тяхното поведение. Именно с такава стойност се откроява и настоящото изследване, което демонстрира една новооткрита особеност в разпространението на протуберансовото вещество във височина по време на ерупция.

3.1 Наблюдателни данни

Като основен източник на наблюдателни данни са избрани два космически телескопа. За проследяване поведението на протуберанси при ерупция са използвани данни от инструмента Atmospheric Imaging Assembly (AIA) на борда на Solar Dynamics Observatory (SDO) [41] на целия диск в линията HeII 304 Å, регистрирани през период от около 5 минути. AIA има поле над $1.3R_{\odot}$ и пространствена разделителна

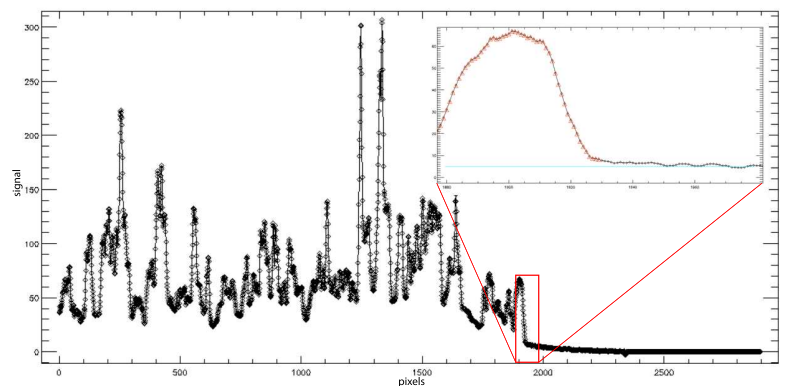
способност $\sim 1.5''$. Короналното обкръжение на влакната е инспектирано по наблюдения с дължина на вълната FeXIV 211 Å.

За проследяване ерупцията на влакната извън зрителното поле на AIA са използвани наблюдения на инструмента LASCO (Large Angle and Spectrometric Coronagraph) на борда на SOHO (Solar & Heliospheric Observatory), който разполага с коронографите C2 и C3, наблюдаващи в бяла светлина с обхват, съответно от 2 до $6R_{\odot}$ и от 3.7 до $32R_{\odot}$. Средното им времево разрешение е ~ 12 минути.

3.2 Обработка и анализ

Обработката на наблюденията и изследване на кинематичните криви на ЕП е осъществена със специално изработена програма, основана на процедури, включени в IDL-базирания продукт SolarSoftware. Първоначалната обработка на данните се изразява в премахване на ефектите от дефектирани пиксели, корекции за премахване на влиянието на топлинния шум и космическите лъчи върху изображението и разделяне на плоски полета.

Преди началото на същинското измерване изображенията се представят по възможно най-удобния за потребителя начин – избират се подходящи цвятова гама и размер, както и диапазон от интензивности, тъй като различната плътност на веществото в различните части на протуберансите, а и във всеки отделен протуберанс, изискват възможност за подчертаване на някои по-слабо излъчващи структури. Следва ротация за ориентиране на основната ос на изследвания протуберанс по хоризонталната ос на изображението. Тъй като изборът на оста на разпространение на всеки протуберанс става ръчно, а това дава възможност за допускане на неточности, програмата обработва освен сигнала от избраната ос и този от околните 6 реда и построява осреднен профил на сигнала – изменение на сигнала на всеки пиксел по оста от центъра на Слънцето до края на изображението (Фигура 3.1). Определят се границите на слънчевия лимб и на фоновия сигнал и като част от тялото на протуберанса се възприемат само точките, чийто сигнал надвишава 3 пъти стандартното отклонение (σ) при определяне на фона. Потребителят избира най-отдалечената от центъра на Слънцето точка от протуберансовото тяло и се оценява както нейната височина над лимба, така и стойност за грешката при измерването.



Фигура 3.1: Графичен вид на сигнала по хоризонтална ос между центъра на Слънцето и оста на разпространение на ЕП. В мащаб е представена част от същата графика, на която алгоритъмът е обозначил значещите точки от протуберанса.

Определената по този метод най-висока точка от основната ос на протуберанс се визуализира върху изображението и потребителят има възможност да направи проверка на изходните данни от алгоритъма.

Този метод позволява по-точно определяне на най-високата дифузна част на протуберансите спрямо останалите използвани за тази цел методи, намалява възможностите за субективност при определянето ѝ и дава математическа оценка на допуснатите неточности.

Кинематичният профил на ерупциите на височини $> 0.6R_{\odot}$ над лимба, по данни от коронографите на инструмента LASCO, е проследен с помощта на софтуерния продукт StereoCat¹. Така са измерени средни скорости на разпространение и изменението на височината на протуберансите във времето в зрителните полета на LASCO C2 и C3.

¹<https://ccmc.gsfc.nasa.gov/analysis/stereo/>

3.3 Резултати

Изследването на поведението на протуберанси по време на ерупция обхваща 41 случая от различни години след началото на мисията SDO (в периода 2010–2017 г.). За асоциирането на протуберансите с АО са използвани както идентификацията в SolarMonitor², така и наблюдения от инструмента AIA на дължини на вълните 1600 Å, 1700 Å и 4500 Å. По тези източници е установено, че 14/41 протуберанса (34%) са свързани с АО, докато за останалите 27 (66%) такава асоциация не е наблюдавана. За свързването на ЕП с ИКМ са използвани данни от каталозите: SOHO LASCO CME Catalog³ [19] и AIA Filament Eruption Catalog⁴ [37]. От разглежданите тук 41 ЕП 71% са свързани с ИКМ.

Протуберансите са разделени по тип (Фигура 3.2) според магнитните инверсни линии, върху които се разполагат (вж. Секция 1.1.1) – протуберанси в активни области (ПАО), протуберанси, разположени между две съседни активни области (ПМАО), протуберанси в спокойни области (ПСО) и такива в полярните зони (ПП). Групата от представени 41 протуберанса се състои от 20% ПАО (8/41), 17 ПСО (41%), 15% или 6 случая на ПМАО и 24% (10/41) ПП.

Протуберансите са разделени още според хелиографската ширина, на която са наблюдавани – средни ширини (СШ) $< 50^\circ$ и полярни ширини (ПШ) $> 50^\circ$. Границата от 50° е взаимствана от други изследвания (напр. [37]). Съотношението в изследваната група е 76–24% в полза на средните ширини.

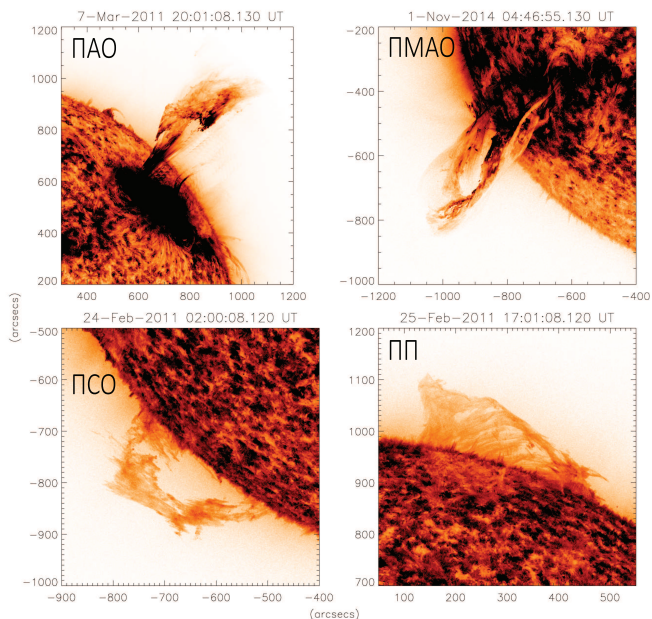
Видът на ЕП (симетричен или асиметричен) е определен спрямо тяхната геометрия, като двата класа са почти по равно представени с леко превъзходство на асиметричните (46–54%), а видът на ерупцията (пълна, частична или ограничена) – според количеството протуберансово вещество, напускащо гравитационното поле на Слънцето. Пълните и частичните ерупции, включени в извадката, са по равен брой ($2 \times 37\%$) и се допълват от 26% ограничени ерупции. Разпределението на видовете протуберанси по категории е обобщено в Таблица 3.1.

Настоящото изследване разглежда колебания на скоростите на издигане на протуберансовото вещество по време на ерупция. Подобни осцилаторни движения при ЕП не са докладвани преди. Известни

²<https://solarmonitor.org/>

³https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/index.html

⁴<http://aia.cfa.harvard.edu/filament/>



Фигура 3.2: Примери за различните типове ЕП – протуберанси в активни области (ПАО), протуберанси между активни области (ПМАО), протуберанси в спокойни области (ПСО) и полярни протуберанси (ПП).

са няколко сходни изследвания, разглеждащи разпространението на ИКМ, които включват както единични случаи [39], така и извадки от събития [31, 47].

Анализът на осцилациите е направен по построените профили на ЕП височина–време $h(t)$ и скорост–време $v(t)$. Височината h (както и абсолютната грешка) в различните моменти от време е измерена пряко по описания в Секция 3.2 начин. Моментната скорост на ерупциите е определена по данните от две последователни измервания на

Таблица 3.1: Обобщение на видовете изследвани ЕП по категории.

Характеристики	Категории	Типове протуберанси				
		Всички	ПАО	ПМАО	ПСО	ПП
Асоциирани АО	Да	14	8	6	0	0
	Не	27	0	0	17	10
ИКМ	Да	29	5	5	12	7
	Не	12	3	1	5	3
Локация	СШ	31	8	6	17	0
	ПП	10	0	0	0	10
Симетрия	Симетричен	19	4	5	6	4
	Асиметричен	22	4	1	11	6
Вид ерупция	Пълна	15	3	4	6	2
	Частична	15	2	1	6	6
	Ограничена	11	3	1	5	2
Видими в LASCO	само в С2	3	0	1	2	0
	в С2 и С3	7	2	0	4	1

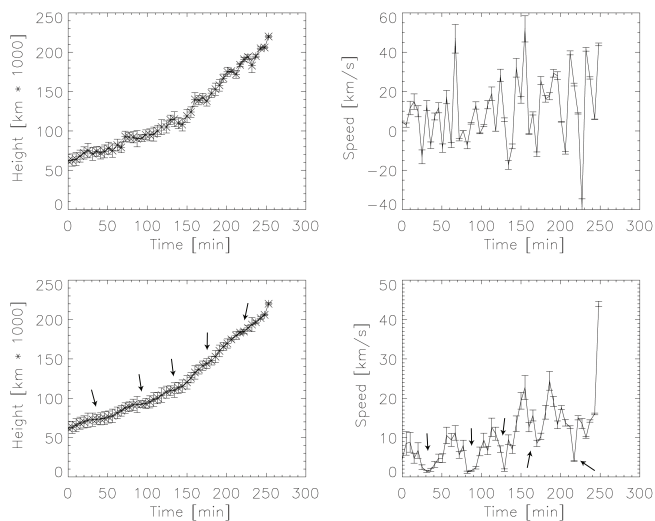
височината на протуберанса във времето:

$$v_i = \left(\frac{\Delta h}{\Delta t} \right)_i = \frac{h_{i+1} - h_i}{t_{i+1} - t_i}, \quad (3.1)$$

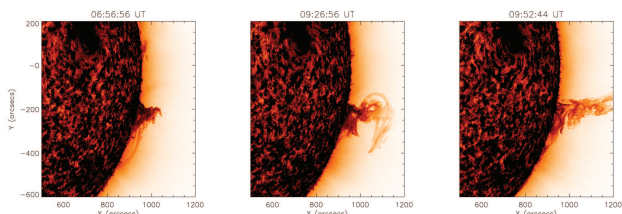
като височината, съответстваща на дадена моментна скорост v_i , е $h = (h_i + h_{i+1})/2$.

Освен отчитането на точността на използваните величини са въведени няколко допълнителни критерия за по-голяма достоверност на получените резултати. С цел избягване на фалшиви пикове дори след изглаждане на данните, приемаме, че отклонение от разпределението на височината и скоростта във времето е достоверно само ако е забележимо едновременно и на двете графики и продължава на повече от 2 последователни кадъра (> 15 минути). Всичко това е придружено и от визуална инспекция на изображенията на ерупцията за изключване възможността за влияние на някои малки вътрешни движения на плазмата от протуберансовата примка, усукване или хоризонтално движение на тялото на влакното. Пример за описаната процедура са графиките височина–време $h(t)$ и скорост–време $v(t)$ на протуберанса от 2010/08/07, показани на Фигура 3.3.

Така описаната процедура е приложена на пълния списък с 41 протуберанса. След изглаждане на профилите при 7 от протуберансите, колебания в разпространението не могат еднозначно да се иденти-



Фигура 3.3: Графики височина–време $h(t)$ (ляво) и скорост–време $v(t)$ (дясно) за ЕП от 2010/08/07 преди (горе) и след (долу) изглаждането на данните. Със стрелки са означени колебанията в графиките след изглаждане.

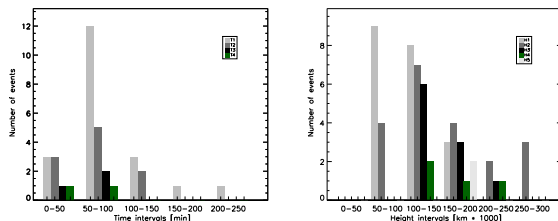


Фигура 3.4: Кадри от инструмента AIA на ЕП от 2010/08/07.

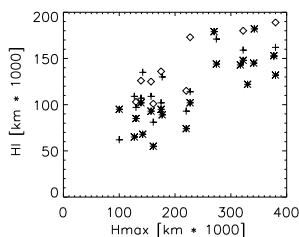
фицират. При 14 ЕП такива се забелязват, но те се случват веднъж за цялата ерупция и интервал между тях не може да бъде установен. Категорично могат да бъдат определени 20 случая, при които осцилации се наблюдават повече от веднъж за времето на ерупцията, поради което те са избрани за основен обект на настоящото изследване. Селектираните 20 ЕП включват 3 ПАО, 1 ПМАО, 10 ПСО и 6 ПП. При различните ЕП се наблюдават различен брой пикове на осцилациите – най-много такива (5) са регистрирани при протуберансите от 2010/08/07 и 2011/02/06, 4 броя са пиковите при други два, а останалите 16 събития имат по 2 или 3 върха. Пресметнати са интервалите между пиковите на осцилациите (T_k при $1 \leq k \leq 5$) и височините, на които те са наблюдавани (H_l при $1 \leq l \leq 4$). Определена е максималната височина, която достигат протуберансите в полето на инструмента АІА h_{max} , както и средната скорост на ЕП по време на ерупцията $v_{ср}$.

От измерените времеви интервали между осцилациите може да се направи заключението, че те не са периодични. Стойностите варират между 31 и 244 минути, като наблюдаваното при ИКМ нарастване на интервалите във височина [47] се наблюдава при едва 3 ЕП. Най-често продължителността на времето между осцилациите е 50–100 минути, но не са рядкост и такива с продължителност 0–50 минути или 100–150 минути (Фигура 3.5 ляво). По-продължителните отстояния (<150 минути) са по-скоро спорадични. От протуберансите, при които осцилации на скоростта изобщо не са регистрирани, в 2/7 случая продължителността на ерупцията е под 31 минути ($\Delta T < T_{min}$), което ги прави непредставителни за наличието на търсените отклонения.

Височините, на които се наблюдава забавяне на издигане на веществото, също лежат в интервала 55 000–296 000 km. Най-често първите колебания се проявяват във височини между 50 000 и 100 000 km, но могат да се очакват и в интервала между 100 000 и 200 000 km. Следващите осцилации (от втори, трети и четвърти порядък) най-често се случват при височина на ЕП над лимба 100 000–150 000 km (Фигура 3.5 дясно). Прави впечатление добрата корелация между максималната височина, която достигат ЕП h_{max} , и височините, на които се наблюдава забавяне на скоростта на издигане на плазмата H_l (Фигура 3.6). Коефициентите на Pearson (r) за височините от различен порядък (означени с различни символи върху графиката) са съответно: $r_1 = 0.80$; $r_2 = 0.75$; $r_3 = 0.75$, т.е. влиянието на максималната височи-



Фигура 3.5: Разпределение на интервалите между осцилациите според тяхната продължителност (ляво) и според височината, на която са регистрирани (дясно). С различни цветове са означени броят интервали от определен порядък.

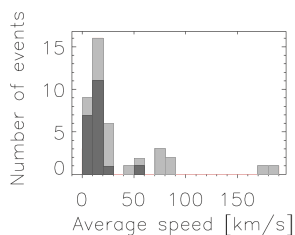


Фигура 3.6: Графично представяне на зависимостта между максималната височина на ЕП h_{max} и височините на забавяне на скоростта им H_l ($1 \leq l \leq 3$). С различни символи е означена поредността на осцилациите: Н1 – със звездичка, Н2 – кръстче и Н3 – ромб.

на, която ще достигне ЕП, върху височините, на които се наблюдават осцилациите, е определящо в $>56\%$ ($r_{min}^2 \times 100$) от изследваните случаи. Височини на осцилациите от по-голям порядък (Н4 и Н5) не са разглеждани поради малкото на брой ЕП, които проявяват такива.

Средните скорости показват, че осцилиращите ЕП не са сред най-бързите ($4 \leq v_{cp} \leq 55 \text{ km s}^{-1}$). Фигура 3.7 показва, че 95% от протуберансите, показващи отклонения на скоростите, имат $v_{cp} < 30 \text{ km s}^{-1}$.

Само един протуберанс достига средна скорост $v_{cp} > 50 \text{ km s}^{-1}$, но сравнението с пълната извадка от ЕП показва, че селектираните 20 не са изключение от общата зависимост – само 24% от всички разглеждани протуберанси имат средни скорости $v_{cp} > 30 \text{ km s}^{-1}$. Вероятно това се дължи на факта, че голяма част от ерупциите включват фаза на активиране с характерни скорости $1\text{--}10 \text{ km s}^{-1}$ (вж. Секция 2.3). Получените скорости попадат в границите, определени от друго изследване ($<100 \text{ km s}^{-1}$) [25].

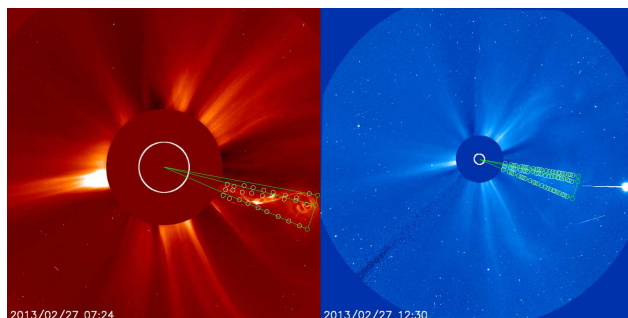


Фигура 3.7: Разпределение на ЕП по средни скорости. В светлосиво са всички 41 ЕП от извадката, а в тъмносиво – изследваните за осцилации 20 от тях.

От селектираните 20 ЕП само 3 продължават ерупцията си след напускането на зрителното поле на AIA. Освен тях 7 от протуберансите, които показват единични колебания в AIA, също могат да бъдат проследени на големи височини.

Измерванията на един от тях в полето на LASCO C2 и C3 са показани на Фигура 3.8. На 2013/02/27 около 05:30 UT ЕП се появява в зрителното поле на LASCO C2 (достига височина $>2R_{\odot}$) и може да бъде проследен в C3 до 12:30 UT, когато се простира на $>18.5R_{\odot}$ над слънчевия лимб. Средните скорости на издигане на веществото в обсега на двата инструмента (C2 и C3) са съответно 387 и 460 km s^{-1} .

Построените графики височина–време $h(t)$ и скорост–време $v(t)$, получени след изглаждане на данните, са показани на Фигура 3.9. Наблюдаваните на по-ниски височини (от AIA) осцилации тук не се забелязват. Зависимостта на височината от времето е близка до линейната, а вариациите на кривата на скоростта се дължат на по-големия



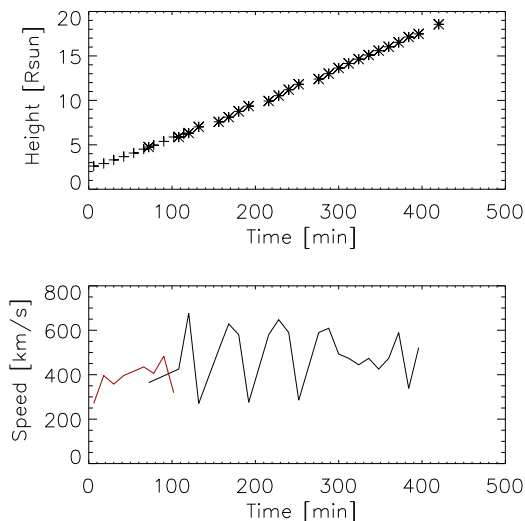
Фигура 3.8: Измерване на височината на ЕП от 2013/02/27 в полето на коронографите на LASCO – C2 (ляво) и C3 (дясно).

интервал между 2 последователни измервания в случаите с липсващи данни. Подобни са и резултатите от измерванията на останалите 9 ЕП, видими от коронографите на SOHO.

3.4 Дискусия

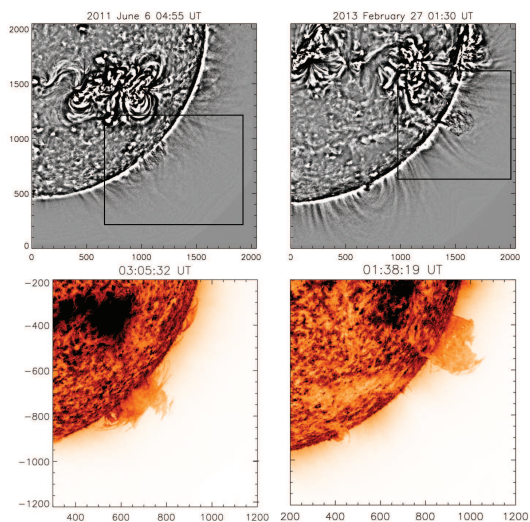
Изследването представя статистическа проверка на хипотезата, че преминаването на веществото на ЕП през различни аркадни структури на обкръжаващото МП може да породи квазипериодични забавяния на издигането. Разгледаните ЕП достигат височини в диапазона $(100 - 380) \times 10^3 \text{ km}$ в зрителното поле на AIA и $4.4 - 22.8R_{\odot}$ в това на коронографите на LASCO. Вероятно поведението на протуберансовото тяло, което се забелязва по профилите на ерупциите, се дължи на взаимодействие с обкръжаващата магнитна конфигурация. Често по време на ерупция се наблюдава сплескване на връхната част от протуберансовата примка, която по този начин очертава границите на част от коронална структура, състояща се от протуберанс и кухня [3].

Обикновено короналните структури се наблюдават в бяла светлина над протуберанси по време на ПСЗ или на дължина на вълната 211 \AA . На Фигура 3.10 са показани 2 ЕП и тяхното обкръжение в последните моменти от активацията им и точно преди началото на



Фигура 3.9: Профили височина–време $h(t)$ (горе) и скорост–време $v(t)$ (долу) на ЕП от 2013/02/27 в полето на коронографите C2 (кръстчета) и C3 (звездички) на инструмента LASCO.

еруптивната фаза. За засилване на контраста на магнитните образувания изображенията са показани като разлики между оригиналния кадър на AIA и версия на същия с приложено премахване на нееднородности чрез изглаждане. Въпросът за връзката между протуберансите и кухините в короната все още няма категоричен отговор, макар че мнението, че всички влакна имат в обкръжението си кухня, е все по-широкоразпространено. Вероятно наблюденията на протуберанси без асоциирани кухни в короната се дължат на ефекти на проекцията по лъча на зрение при закриване на кухнята от излъчваща арка на преден план [13]. Нарастването на скоростта на издигане на ЕП продължава над кухините в отворените структури, наблюдавани в коронографите на LASCO. За магнитни структури в обкръжението на протуберансите са проверени още данните във филтър AIA 193 Å.



Фигура 3.10: Кадри на два ЕП (2011/06/06 – ляво и 2013/02/27 – дясно) от инструмента AIA: обкръжението на ЕП, изобразено чрез разлики между изображения във филтър 211 \AA (горе) и структура на ЕП на дължина на вълната 304 \AA (долу).

При преминаването през отворени магнитни структури на височини над $2R_{\odot}$ [10, 15] веществото достига зона на свободно ускорение без осцилации. А в диапазона $0.6\text{--}2R_{\odot}$, след като ЕП напусне обсега на AIA и преди да се появи в този на LASCO, няма наблюдателни данни, които да показват наличието или липсата на осцилации.

3.5 Наблюдения на протуберанси по време на пълно слънчево затъмнение

3.5.1 Основни данни за затъмнението от 21 август 2017 г.

Ивицата на тоталитета на пълното слънчево затъмнение от 21 август 2017 г. пресича по дължина цяла Северна Америка. Пътят на лунната сянка по Земята започва от Тихия океан в 16:48 UT и достига западното крайбрежие на САЩ в щата Орегон в 17:15 UT. Напуска бреговете на САЩ в 18:49 UT, за да продължи през Атлантическия океан. Краят на пълното затъмнение настъпва в 20:02 UT на повече от 1100 km западно от бреговете на Сенегал. Най-дълга е пълната фаза (160.2 s) за наблюдателите от щата Илинойс, разположени на около 250 km южно от щатската столица Спрингфийлд.

3.5.2 Локация на екипа

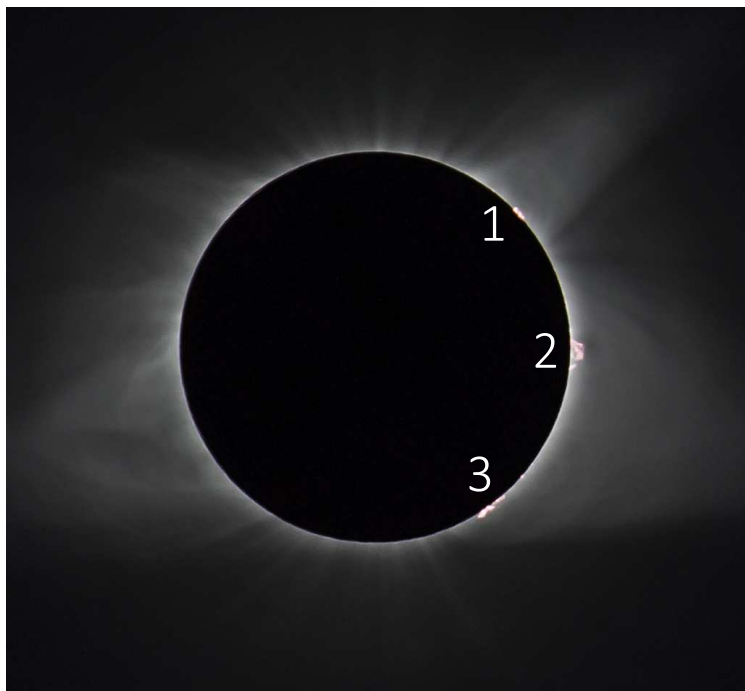
Използвайки прогнозни метеорологични данни, нашият екип избра да се разположи в околностите на град Мадрас, Орегон ($44^{\circ}.70321$ С, $120^{\circ}.79783$ З), близо до западното крайбрежие на САЩ – под 20% очаквана средна облачна покривка за 21 август 2017 г., макар и при 36 s по-кратък тоталитет.

3.5.3 Проведени експерименти и резултати

Тук са разгледани само изследванията на наблюдаваните по време на затъмнението протуберанси. За заснемането им са използвани 3 цифрови фотоапарата – Canon EOS 60D, оборудван с 200-мм обектив, Canon EOS 350D с 200-мм обектив, конвертор за двукратно увеличение и поляризационен филтър, както и Canon EOS-1Ds Mark II, снимащ през рефрактор Vixen 81/625 с конвертор (2x) и поляризационен филтър. Всички те са монтирани на стативи с глави без системи за водене.

Изображение, получено чрез комбинация на 9 кадъра с различни експозиции, заснети по време на пълната фаза, показва три протуберанса на западния слънчев лимб (Фигура 3.11). Основните данни за тях са обобщени в Таблица 3.2.

Детайлна структура на слъчевата корона на разстояние до $0.5R_{\odot}$ от лимба ни показват данните от инструмента AIA в канала 171 \AA (Фигу-



Фигура 3.11: Композитно изображение, съставено от 9 снимки, заснети с Canon EOS 350D с 200-мм обектив и конвертор за двукратно увеличение, с различни експозиции между 1/1000 и 1/125, показващо наблюдаваните протуберанси.

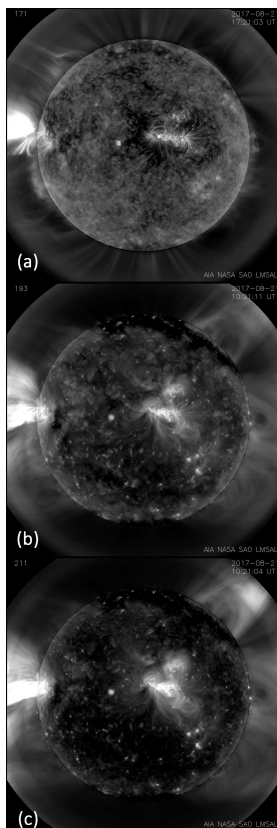
ра 3.12а). На кадъра се виждат централно разположената АО 12671, както и новопоявяващата се на източния лимб 12672. Ясно изразена е структурата на короната в полярните области с характерните образувания – полярни пера, но хладните протуберанси не се наблюдават, освен части от протуберанс 2, видими на западния лимб. Изображения от AIA 211 Å (Фигура 3.12с) показват обкръжението на протуберансите в ниската корона. Най-характерна е структурата над екваториал-

Таблица 3.2: Информация за протуберансите, наблюдавани по време на затъмнението. Позиционният ъгъл е измерен спрямо северния полюс на Слънцето по посока обратна на часовниковата стрелка. Използвана е номерацията от Фигура 3.11

Параметър	Протуберанс 1	Протуберанс 2	Протуберанс 3
Поява [мм/дд]	08/19	08/19	08/20
Изчезване [мм/дд]	08/23	08/23	08/23
Позиционен ъгъл	314°	270°	216°
Ъглов размер	≈4°	≈12°	≈8°
Асоциирани АО	няма	няма	няма
Асоциирани ИКМ	няма	няма	няма
Височина [$\times 10^3$ km]	22 ± 6	50 ± 6	28 ± 6

ния протуберанс, където се забелязва короналната кухня в основата на аркообразната структура, разположена в единия край на коронален стример. Наличието на области с по-ниска плътност над влакната на разстояния $< 0.5R_{\odot}$ от лимба предполага взаимодействие между свързаните с тях магнитни структури при вертикални движения на протуберансовото вещество, което може да подпомогне изучаването на трудните за наблюдение кухни. В другия край на същия стример е разположен протуберанс 3, чиято кухня и аркада не са толкова добре изразени. Във височина шлемовидните стримери могат да бъдат проследени на Фигури 3.11 и 1.2.

В обкръжението на протуберанс 1, разположен на северозападния лимб, се наблюдава подобна структура, макар и в основата на далеч по-малък псевдостример. По наблюдения на дължина на вълната 193 Å (Фигура 3.12b) обаче се забелязва, че протуберансът и неговото обкръжение са разположени в коронална дупка.



Фигура 3.12: Комбинирани изображения от инструмента AIA на SDO по време и около ПСЗ с различни филтри в крайна ултравиолетова област. (a) 171 Å. (b) 193 Å. (c) 211 Å. Процедурата *aia_rfilter* позволява изостряне на короналната структура и разкрива детайли от обкръжението на протуберансите.

Глава 4

Връзка между протуберанси и потоци заредени частици

Целта на представените изследвания е оценка на връзката между протуберансите и заредените частици, използвайки най-обширната извадка от събития и най-висококачествените наблюдения на протуберанси досега.

4.1 Селекция на събитията

Подборът на протонни събития е направен по данни от инструмента SOHO/ERNE в канала 17–22 MeV. За изследвания период (2010–2016 г.) са регистрирани 186 случая на слънчеви енергетични частици, достигащи околоземното пространство. Определянето на източника на изследваните събития (асоцирането им с ИКМ или избухване) се оказва възможно при 111/186 (60%) от случаите, докато при други 45 случая е асоциирана само една от формите на слънчева активност. Установяването на източника на останалите 30 протонни събития е затруднено (поради липса на данни, комплексни случаи, голяма степен на несигурност и др.) и тези събития не се отчитат в направената статистика. Сред използваните източници на информация за събитията са: списъците с избухвания на GOES¹, идентификацията на

¹https://hesperia.gsfc.nasa.gov/goes/goes_event_listings/

радиоизбухвания [38] и каталогът с ИКМ на SOHO/LASCO² [19].

4.2 Наблюдения на асоциирани протуберанси

Свързаните със заредени частици протуберанси са определени по данни за протонните събития (време на регистрация и мощност), техните източници и асоциирани явления (времена за начало и максимум, хелиографски координати, размер и позиционен ъгъл, асоциация с АО).

Данните от инструмента AIA на дължина на вълната 304 Å са основен източник на наблюдения на влакна и протуберанси. При търсенето на протуберанси, разположени зад слънчевия лимб от гледна точка на SDO, са използвани наблюдения на ултравиолетовата камера с висока резолюция – 1.6" (EUVI/SECCHI – Extreme Ultraviolet Imager/Sun Earth Connection Coronal and Heliospheric Investigation) в линията HeII 304 Å на телескопите на STEREO (Solar TERrestrial RELations Observatory). В случаите, когато данните от космическите телескопи не са достатъчни за асоцииране на протуберанси с протонни събития, са използвани и наземни наблюдения на част от телескопите, обединени в The Global High-Resolution H_α Network – Big Bear Solar Observatory в Калифорния и Kanzelhöhe Solar Observatory в Австрия.

За пълната статистика е важно определянето и на обратната връзка (колко от протуберансите водят до протонни събития). За целта е необходим пълен списък на наблюдаваните влакна, какъвто не ни е известен. Затова е използван каталогът с наблюдения на ЕП от AIA³ [37] за периода април 2010 г.–октомври 2014 г.

4.3 Статистически резултати

4.3.1 Корелационен анализ на връзката на заредени частици с протуберанси

Връзката на потоците от заредени частици с протуберанси е определена по данните за асоциираните избухвания и ИКМ – 143/156 протонни събития са съпътствани от появата на влакно (92%), докато в останалите 13/156 случая (8%) такова не се наблюдава. Нарастване

²https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/

³http://aia.cfa.harvard.edu/filament/catalog_table.txt

честотата на появата на потоци от заредени частици се наблюдава при достигане на 24-тия слънчев максимум през април 2014 г.

Протонните събития с идентифициран източник често възникват в областта $\pm 30^\circ$ около екватора, предпочитайки хелиографски ширини до $\pm 15^\circ$. Освен това 57% (86/152 случая) от частиците произхождат северно от екватора и 43% (66/152 случая) – на юг от него, което потвърждава резултатите от предишни изследвания [5]. Забелязва се, че частиците предпочитат северната полусфера преди максимума на слънчевия цикъл и южната след това. Потвърждава се и добре известният наблюдателен факт за доминиращия произход на частици от западната полусфера (68% или 103/152 случая).

Установени са някои зависимости за потоците от частици и техните източници. Тези събития, при които протуберанс не се наблюдава, имат по-малък интензитет. Избухванията, които пораждат потоци от заредени частици без протуберанс, са от класове от С до Х. Разпределението по скорост на ИКМ (най-отдолу) показва, че събитията, които не са свързани с влакна, се асоциират с по-бавни ИКМ.

Протуберансите, свързани с поява на поток от заредени частици, възникват в АО в 88% от случаите. Едва 17 (около 12%) от 143 протуберанса, са локализирани извън АО.

Освен с избухвания и ИКМ, е разгледана и връзката на всяко събитие с радиоизбухване тип II. Има данни за общо 149 случая в короналния диапазон, като в 87 от тях е установено наличие на радиоизбухване от тип II, както и за 152 случая в междупланетния диапазон – 97 от тях придружени от тип II. От протонните събития, свързани с протуберанси, 77 радиоизбухвания от тип II са в короната и 87 – в междупланетното пространство. Резултатите показват, че малко повече от половината събития с влакна са придружени от радиоизбухване и в короната (56%), и в междупланетната среда (63%).

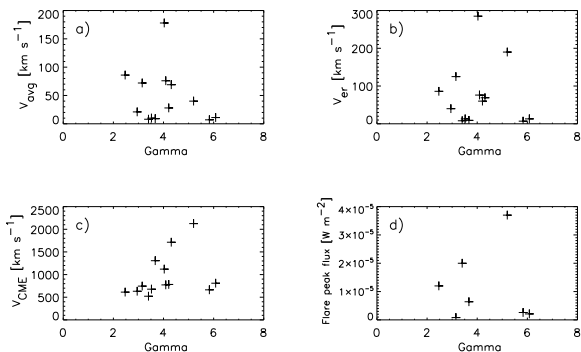
В търсене на връзка между физическите характеристики на протонните събития и кинематиката на свързаните с тях ЕП от всички 143 протуберанса са изключени 67 влакна върху диска, бързите ерупции (който продължават по-малко от 15 минути), малките и/или тесни протуберанси, както и тези, които показват само хоризонтални движения. Остават 13 протуберанса, чието поведение при ерупция е проследено. Определена е средната им скорост на издигане за цялата ерупция (v_{avg}) и средната скорост на издигане по време на еруптивната фаза (v_{er}).

Направена е съпоставка на кинематичните криви на ЕП с енергийните спектри на заредените частици, получени по наблюдения на SOHO/ERNE в диапазона 14–131 MeV. Получените спектри се описват от степенна функция във вида $\frac{dN}{dE} = kE^{-\gamma}$, където N – плътност на потока от частици, E – енергия, k – константа. Това позволява да се определи спектралният индекс γ . Изследваните събития имат спектрални индекси в интервала $2.95 \leq \gamma \leq 6.08$.

Разпределението по спектрален индекс γ е съпоставено с 4 основни параметъра на асоциираните активни образувания – средна скорост v_{avg} и скорост от еруптивната фаза v_{er} на ЕП, скорост на ИКМ v_{CME} и мощност на избухването P (Фигура 4.1). Анализ на връзките между тях е направен с помощта на коефициентите на Pearson (r) за всяка двойка. Висока положителна корелация със спектралния индекс на заредените частици γ показва скоростта на ИКМ v_{CME} ($r = 0.70$). Коефициентът на детерминация $r^2 = 0.49$ показва, че в 49% от случаите стойностите на v_{CME} са в тясна зависимост с тези на γ . Постръмните енергийни спектри на протонни събития (с по-големи стойности на γ) са свързани с по-бързи ИКМ. Този резултат потвърждава, че нискоенергетичните протони имат по-силна зависимост със скоростта на ИКМ [8].

4.3.2 Корелационен анализ на връзката на еруптивни протуберанси със заредени частици

За обратната асоциация на влакна с потоци от частици са използвани описанията в каталога на AIA [37] времена на ерупция и данни за асоциираните с ЕП избухвания, ИКМ и АО. Считаме за свързани ЕП и протонно събитие в случай, че началото на регистрирането на частиците на 1 а. ед. става в рамките на 4 часа след края на ерупцията – време, необходимо за ускорението и придвижването на частиците до детекторите, особено за събитията, възникващи в източната полусфера. Този времеви интервал е съобразен със средния период между началото на слънчево избухване и съответно протонно събитие [38]. Тези съображения са изпълнени за едва 51 случая, което оценява вероятността за поява на протонно събитие при наблюдение на ЕП на около 5% (51/954). Заради гореописаните критерии и пропуснатите в каталога АП и СП този процент може да се разглежда като долна граница на степента на асоцираност.



Фигура 4.1: Разпределения по спектрален индекс γ на: (а) средна скорост на ЕП v_{avg} , (b) средна скорост на ЕП за еруптивната фаза v_{er} , (c) скорост на ИКМ и (d) мощност на изригване.

Предвид представената в каталога на ЕП класификация можем да направим следните изводи: 20/51 влакна, след които се наблюдават протонни събития, възникват в спокойни области; 16/51 са ЕП в АО; 4/51 са разположени между АО; само 1 ЕП е разположен близо до екватора; и 7/51 – полярни протуберанси; 3 от случаите не са класифицирани.

Разпределенията на свързаните с ЕП протонни събития и асоциираните с тях явления потвърждават очакванията, че източниците на заредени частици са сред по-мощните еруптивни явления. Те показват средноаритметични/медианни стойности за клас избухване и скорост на ИКМ, съответно C8.9/C6.9 и $570/510 \text{ km s}^{-1}$ срещу C2.7/C2.3 и $430/390 \text{ km s}^{-1}$ при явленията, свързани с пълната извадка от ЕП.

Глава 5

Заклучение

5.1 Основни резултати и изводи

- След анализ на профилите височина–време, скорост–време и скорост–височина на 41 ЕП по данни от инструмента AIA на SDO са отчетени осцилации на скоростта на издигане на протуберансовото вещество в 34 случая (83%). Подобни движения до момента са наблюдавани единствено при ИКМ [31, 39, 47].
- При 20 от 34 ЕП за времето на изследване е регистрирано повече от едно колебание, което позволява измерване времевите интервали между тях. Строга периодичност не е открита, като интервалите варират между 31 и 244 минути с най-голяма честота в диапазона между 50 и 100 минути. Височините, на които се наблюдава забавяне на издигането, варират в границите 55 000–296 000 km. Първото забавяне обикновено се наблюдава на височина 50 000–100 000 km, а следващите – между 100 000 и 150 000 km.
- Осцилациите не са детектирани при нито един от 10 случая, в които ЕП продължава издигането си в зрителното поле на коронографите C2 и C3 на инструмента LASCO на SOHO.
- Причината за наблюдаваните осцилации вероятно се крие във взаимодействието на магнитната структура, в която протубе-

рансовото вещество остава замръзнало по време на ерупция и обкръжаващите магнитни аркади.

- Заснети и обработени са кадрите на протуберансите и слънчевата корона, видими по време на ПСЗ от 21 август 2017 г. Сред трите видими протуберанса на западния лимб няма нито един еруптивен, което не позволява изследване на кинематичните им характеристики. Проследено е тяхното формиране назад във времето, потърсени са връзки с други активни образувания, разгледано е обкръжението им по данни от SDO. Над един от протуберансите има ясно изразена коронална кухня – коронални области с по-ниска плътност от обкръжаващата я среда, свободна от затворени магнитни структури. Преминването на протуберансово вещество по време на ерупция през тях може да послужи като трасер, определящ границите на кухините.
- Представено е най-подробното статистическо изследване на връзката между протуберансите и потоците заредени частици, за което са използвани както космически наблюдения – от SDO, STEREO и SOHO, така и наземни – от H_{α} телескопите в Big Bear Solar Observatory и Kanzelhöhe Observatory. За периода 2010–2016 г. са изследвани 156 протонни събития.
- Установено е, че асоциираните с влакна протонни събития са почти от тези, които не са придружени от протуберанс (92–8%).
- Повече събития със заредени частици произлизат от северното полукълбо (57–43%), като предпочитаната полусфера се променя с настъпването на максимума на слънчева активност. Освен това в рамките на изследвания период западната полусфера е предпочитана пред източната (68–32%).
- Типичните области, от които произхождат протонните потоци, са на хелиографски ширини до $\pm 30^{\circ}$ от слънчевия екватор. А най-голям процент от събитията се образуват в зоните със средни ширини около $\pm 15^{\circ}$. Свързаните с протуберанси събития имат по-широки граници на образуване (регистрирани са и 7 събития в полярните зони).

- 88% от свързаните с протуберанси потоци от заредени частици са свързани с АО. Останалите 12% представляват едва 17 случая за период от 6 години. Случаите на протуберанси извън АО, които се асоциират с енергетични частици, са рядкост. Две такива явления са докладвани и преди [17, 28] – от 2011/11/26 и 2013/09/29, макар че настоящото изследване свързва първото от тях с АО 11353.
- Протонните потоци, асоциирани с протуберанси, често са придружени от радиоизбухвания в короната (56%) и в междупланетната среда (63%). Случаите, в които протоните са придружени както от коронално, така и от междупланетно радиоизбухване, представляват 45% от събитията с протуберанси, 14% се регистрират само в короната. Признаци на радиоизбухвания тип II в короната не се детектират, но се регистрират междупланетни такива в 19% от случаите, а в останалите 22% няма данни за възникнали радиоизбухвания от тип II.
- Установен е интервал от характерни спектрални индекси за 13 селектирани протонни събития, свързани с влакна – $2.95 \leq \gamma \leq 6.08$. Има съвпадение с определената по-рано долна граница $\gamma \geq 2$ [29], но е по-широк от друг диапазон $4.15 \leq \gamma \leq 4.69$ [17], което се дължи на факта, че настоящото изследване съдържа по-голяма извадка от събития, данни от повече енергийни канали и не всички изследвани събития произхождат извън АО.
- Висока положителна корелация е открита между спектралния индекс γ и скоростта на свързаните със заредените частици ИКМ. По-стръмните енергийни спектри на протонни събития (с по-големи стойности на γ) се дължат на по-бързи асоциирани ИКМ в поне 49% от случаите.
- Едва 5% от описаните в каталог с наблюдения от АІА ЕП се свързват с потоци от заредени частици. Тъй като каталогът не съдържа данни за АП и СП, разглеждайки връзката на протонни събития с протуберанси като цяло, тази стойност следва да се възприема като долна граница.

5.2 Основни публикации

Резултатите от настоящата дисертация са публикувани в:

- **Tsvetkov, Ts.**, Miteva, R., Petrov, N.: 2019, *Filaments related to solar energetic particles*, AIP Conference Proceedings, Vol. 2075, Issue 1, id.090013 – SJR без IF.
- Miteva, R., **Tsvetkov, Ts.**: 2019, *Spectral analysis of SOHO/ERNE protons in solar cycles 23 and 24*, AIP Conference Proceedings, Vol. 2075, Issue 1, id.090014 – SJR без IF.
- **Tsvetkov, Ts.**, Petrov, N.: 2018, *Three case studies of height-time profiles of prominence eruptions observed by AIA and LASCO*, Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, Vol. 177, p. 29-37 – Q2.
- **Tsvetkov, Ts.**, Miteva, R., Petrov, N.: 2018, *On the relationship between filaments and solar energetic particles*, Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, Vol. 179, p. 1-10 – Q2.
- Bogomolov, A. V., Myagkova, I. N., Myshyakov, I., **Tsvetkov, Ts.**, Kashapova, L., Miteva, R.: 2018, *Comparative analysis of the proton generation efficiency during 17 March 2003 and 11 April 2004 solar flares*, Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, Vol. 179, p. 517-526 – Q2.
- Myshiakov, I., **Tsvetkov, Ts.**, Petrov, N.: 2018, *Comparison of kinematics of the solar eruptive prominence and spatial distribution of the magnetic decay index*, Proceedings of the Tenth Workshop “Solar Influences on the Magnetosphere, Ionosphere and Atmosphere”, held 4-8 June, 2018 in Primorsko, Bulgaria. Edited by K. Georgieva, B. Kirov and D. Danov., pp. 109-113.
- Myagkova, I., Miteva, R., Kashapova, L., Bogomolov A. V., Petrov. V., **Tsvetkov, Ts.**, Meshalkina, N., Myshyakov, I.: 2018, *The efficiency of solar energetic particle generation: CORONAS-F mission data analysis*, Proceedings of the Tenth Workshop “Solar Influences on the Magnetosphere, Ionosphere and Atmosphere”, held 4-8 June, 2018 in Primorsko, Bulgaria. Edited by K. Georgieva, B. Kirov and D. Danov., pp. 114-118.

- **Tsvetkov, Ts.**, Petrov, N.: 2018, *Kinematics of Prominence Eruptions*, *Astronomical & Astrophysical Transactions*, Vol. 30, Issue 4, p. 479-488.
- Miteva, R., Kashapova, L., Myagkova, I., Meshalkina, N., Petrov, N., Bogomolov, A., Myshyakov, I., **Tsvetkov, Ts.**, Danov, D., Zdanov, D.: 2017, *The origin of SEP events: New research collaboration and network on space weather*, *Proceedings of the Thirteenth International Scientific conference "Space, Ecology, Safety – SES2017"*, held 2-4 November 2017 in Sofia, Bulgaria. Edited by G. Mardirossian, Ts. Srebrova and G. Jelev. ISSN: 1313-3888, p. 57-62.

5.3 Други публикации

- Petrov, N., Kjurkchieva, D., **Tsvetkov, Ts.**: 2018, *Modern History of Astronomy in Bulgaria*, *Astronomical & Astrophysical Transactions*, Vol. 30, Issue 4, p. 441-452.
- Ovcharov, E., Enikova, P., Kurtenkov, A., Nikolov, G., Trifonov, T., Bozhilov, V., Ganchev, G., **Tsvetkov, Ts.**, Genkova, Ts., Valcheva, A., Nedialkov, P.: 2013, *Probable nova and R-band photometry of another four novae in M31*, *The Astronomer's Telegram*, No.5569.
- Ovcharov, E., Kurtenkov, A., Enikova, P., Ganchev, G., Bozhilov, V., **Tsvetkov, Ts.**, Genkova, Ts.: 2013, *Optical photometry of B2 2308+34 and MASTER OT J234843.23+250250.4*, *The Astronomer's Telegram*, No.5564.
- Ovcharov, E., Kurtenkov, A., Enikova, P., Ganchev, G., Bozhilov, V., **Tsvetkov, Ts.**, Genkova, Ts.: 2013, *Optical photometry of BL Lac*, *The Astronomer's Telegram*, No.5558.

5.4 Участия в научни форуми

Резултатите от настоящата дисертация са представени като доклади:

2019

- Tsvetkov, Ts., Miteva, R., Petrov, N., Myshyakov, I., Dynamic features of eruptive prominences related to solar energetic particles, Fourteenth Annual Conference “Plasma physics in the solar system”, Moscow, Russia (доклад).
- Kashapova L. K., Miteva R., Myagkova I. N., Bogomolov A. B., Myshyakov I. I., Tsvetkov Ts., On the characteristics of SEP events and their solar sources, Fourteenth Annual Conference “Plasma physics in the solar system”, Moscow, Russia (доклад).
- Tsvetkov Ts., Miteva R., Temmer M., Petrov N., 3D Analysis of SEP-related CMEs, Fourteenth Annual Conference “Plasma physics in the solar system”, Moscow, Russia (постер).
- Tsvetkov Ts., Myshyakov I., Petrov N., Relationship between solar eruptive prominences kinematic properties and magnetic decay index, Fourteenth Annual Conference “Plasma physics in the solar system”, Moscow, Russia (постер).

2018

- Tsvetkov, Ts., Ivanov, E., Petrov, N., Atmospheric phenomena during the total solar eclipse on 21 August 2017, XI Bulgarian-Serbian Astronomical Conference, Белоградчик (доклад).
- Tsvetkov, Ts., Miteva, R., Petrov, N., On the relationship between filament eruptions and solar energetic particles, XI Bulgarian-Serbian Astronomical Conference, Белоградчик (постер).
- Miteva, R., Danov, D., Kashapova, L., Tsvetkov, Ts., Myagkova, I., Meshalkina, N., Petrov, N., Bogomolov, A., Myshyakov, I., Zdanov, D., First year results from the SEP origin project, XI Bulgarian-Serbian Astronomical Conference, Белоградчик (постер).
- Tsvetkov, Ts., Miteva, R., Petrov, N., Prominences and solar energetic particles, X-th Workshop “Solar Influences on the Magnetosphere, Ionosphere and Atmosphere”, Приморско (доклад).

- Tsvetkov, Ts., Petrov, N., Dynamic properties of prominence eruptions observed by AIA and LASCO, XVIth Hvar Astrophysical Colloquium, Hvar, Croatia (доклад).
- Myshiaikov, I., Tsvetkov, Ts., Petrov, N., Influence of the Magnetic Decay Index Spatial Distribution on the Kinematics of the Solar Eruptive Prominence, XVIth Hvar Astrophysical Colloquium, Hvar, Croatia (доклад).
- Tsvetkov, Ts., Miteva, R., Kashapova, L., Myagkova, I., Petrov, N., Meshalkina, N., Bogomolov, A., Myshyakov, I., Zdanov, D., Danov, D., First year results of the Bulgarian-Russian project on the origin of solar energetic particles, XVIth Hvar Astrophysical Colloquium, Hvar, Croatia (постер).
- Tsvetkov, Ts., Miteva, R., Petrov, N., Dynamics of Eruptive Prominences, The International Workshop “Eruptive energy release processes on the Sun and stars: origins and effects”, Irkutsk, Russia (доклад).

2017

- Tsvetkov, Ts., Petrov, N., Kinematics of solar eruptive prominences according to space-based observations, IXth Workshop “Solar Influences on the Magnetosphere, Ionosphere and Atmosphere”, Слънчев бряг, България (постер).
- Tsvetkov, Ts., Petrov, N., Variations in the velocity distribution of eruptive prominences, 15th European Solar Physics Meeting, Budapest, Hungary (постер).
- Miteva, R., Kashapova, L., Myagkova, I., Meshalkina, N., Petrov, N., Bogomolov, A., Myshyakov, I., Tsvetkov, Ts., Danov, D., Zdanov, D., The new SEP-origin project: from network to prospect results, 15th European Solar Physics Meeting, Budapest, Hungary (постер).
- Цветков, Цв., Иванов, Е., Кокотанекова, Р., Димитрова, Р., Петров, Н., Първи резултати от наблюдение на пълното слънчево затъмнение от 21 август 2017 г., XII-та научна конференция на Съюза на астрономите в България, Ивайловград (доклад).

- Miteva, R., Danov, D., Kashapova, L., Myagkova, I., Meshalkina, N., Petrov, N., Bogomolov, A., Myshyakov, I., Tsvetkov, Ts., Zdanov, D., Space weather research: solar energetic particles and their origin, XII-та научна конференция на Съюза на астрономите в България, Ивайловград (доклад).
- Tsvetkov, Ts., Miteva, R., Petrov, N., Relationship between solar eruptive events and energetic particles, Thirteenth International Scientific conference “Space, Ecology, Safety - SES2017”, София (доклад).
- Tsvetkov, Ts., Rudawy, P., Petrov, N., Zapior, M., Plasma velocities of the fine structure of solar prominences, Thirteenth International Scientific conference “Space, Ecology, Safety - SES2017”, София (постер).

2016

- Tsvetkov, Ts., Petrov, N., Kinematics of prominence eruptions, X Serbian-Bulgarian Astronomical Conference, Belgrade, Serbia (доклад).
- Tsvetkov, Ts., Petrov, N., Velocity variations of eruptive prominences, XIVth Hvar Astrophysical Colloquium, Hvar, Croatia (доклад).
- Tsvetkov, Ts., Petrov, N., Kinematics of Prominence Eruptions, International Symposium on Recent Observations and Simulations of the Sun-Earth System, ISROSES III, Златни пясъци, България (постер).
- Tsvetkov, Ts., Petrov, N., Dynamics of Eruptive Prominences, 4th SOLARNET Workshop, United Kingdom (доклад).

5.5 Минимални национални изисквания

Таблица 5.1: Минимални изисквани точки за придобиване на образователна и научна степен „доктор“ според ЗРАСРБ от 13 февруари 2019 г.

Показател	Критерий	Необходим брой точки	Натрупан брой точки
Дисертационен труд за присъждане на образователна и научна степен „доктор“	50	50	50
Публикувана монография, която не е представена като основен хабилитационен труд	30		0
Публикувана книга на базата на защитен дисертационен труд за присъждане на образователна и научна степен "доктор"	30		0
Научна публикация в издания, които са реферирани и индексирани в световноизвестни бази данни с научна информация (Web of Science и Scopus), извън хабилитационния труд	25 т. – Q1 20 т. – Q2 15 т. – Q3 12 т. – Q4 10 т. – SJR без IF	30	3 × 20 т. + 2 × 10 т. = 80 т.
Публикувана глава от колективна монография	15		0
Изобретение, патент или полезен модел, за което е издаден защитен документ по надлежния ред	25		0
Публикувана заявка за патент или полезен модел	15		0
Общо		80	130

5.6 Благодарности

Научната работа по време на докторантурата ми е обезпечена благодарение на:

- Националната програма „Млади учени и постдокторанти“ на Министерство на образованието и науката, одобрена с РМС No. 577/17.08.2018 г. с проект на тема: „Изследване на активни процеси на Слънцето“.

- Проекти към Фонд научни изследвания:

„Изследване на активни слънчеви процеси по време на пълни слънчеви затъмнения и извън тях“ с договор No. КП-06-Н28/4.

„Произход на слънчевите енергетични частици: слънчеви избухвания или коронални изнасяния на маса“ по програма за двустранно сътрудничество 2016 г. България–Русия с договор ДНТС Русия 01/6 (23.06.2017 г.).

„Пренос на маса и ъглов момент в астрофизиката“ с договор 08/1 от 13.12.2016 г.

- Проект за двустранно сътрудничество:

България–Полша: „Дестабилизация и ерупция на спокойни и активни протуберанси: наблюдения и анализ“, P-25/06.08.2015 г.

България–Сърбия: „Оптично търсене на остатъци от свръхнови и НII региони в близки галактики (M81 и M101 групи от галактики)“, P-22/04.07.2017 г.

Дисертантът изказва специални благодарности на гл. ас. д-р Галин Борисов за помощта при разработването на процедурата за определяне кинематичните характеристики на протуберансите по данни от космическата обсерватория SDO.

Библиография

- [1] D. Alexander, R. Liu, and H. R. Gilbert. *ApJ*, 653:719–724, 2006.
- [2] H. W. Babcock and H. D. Babcock. *ApJ*, 121:349, 1955.
- [3] T. Berger. volume 463 of *ASPSCS*, page 147, 2012.
- [4] R. J. Bessey and D. H. Liebenberg. *Solar Phys.*, 94:239–247, 1984.
- [5] R. Chandra, N. Gopalswamy, P. Mäkelä, H. Xie, S. Yashiro, S. Akiyama, W. Uddin, A. K. Srivastava, N. C. Joshi, R. Jain, A. K. Awasthi, P. K. Manoharan, K. Mahalakshmi, V. C. Dwivedi, D. P. Choudhary, and N. V. Nitta. *Adv. Space Res.*, 52:2102–2111, 2013.
- [6] P. F. Chen. *Living Rev. Sol. Phys.*, 8:1, 2011.
- [7] P. F. Chen and K. Shibata. *ApJ*, 545:524–531, 2000.
- [8] M. Dierckxsens, K. Tziotziou, S. Dalla, I. Patsou, M. S. Marsh, N. B. Crosby, O. Malandraki, and G. Tsiropoula. *Solar Phys.*, 290:841–874, 2015.
- [9] O. Engvold, T. Hirayama, J. L. Leroy, E. R. Priest, and E. Tandberg-Hanssen. In *IAU Colloq. 117: Dynamics of Quiescent Prominences*, volume 363, page 294, 1990.
- [10] L. A. Fisk. *ApJ*, 626:563–573, June 2005.
- [11] T. G. Forbes and E. R. Priest. Photospheric Magnetic Field Evolution and Eruptive Flares. *ApJ*, 446:377, June 1995.

- [12] S. E. Gibson, D. Foster, J. Burkepile, G. de Toma, and A. Stanger. *ApJ*, 641:590–605, Apr. 2006.
- [13] S. E. Gibson, T. A. Kucera, D. Rastawicki, J. Dove, G. de Toma, J. Hao, S. Hill, H. S. Hudson, C. Marqué, P. S. McIntosh, L. Rachmeler, K. K. Reeves, B. Schmieder, D. J. Schmit, D. B. Seaton, A. C. Sterling, D. Tripathi, D. R. Williams, and M. Zhang. *Astrophys. J.*, 724(2):1133–1146, 2010.
- [14] H. Gilbert, G. Kilper, and D. Alexander. *ApJ*, 671:978–989, 2007.
- [15] H. R. Gilbert, D. Alexander, and R. Liu. *Solar Phys.*, 245:287–309, 2007.
- [16] H. R. Gilbert, T. E. Holzer, J. T. Burkepile, and A. J. Hundhausen. *ApJ*, 537:503–515, 2000.
- [17] N. Gopalswamy, P. Mäkelä, S. Akiyama, S. Yashiro, H. Xie, N. Thakur, and S. W. Kahler. *ApJ*, 806:8, 2015.
- [18] N. Gopalswamy, M. Shimojo, W. Lu, S. Yashiro, K. Shibasaki, and R. A. Howard. *ApJ*, 586:562–578, 2003.
- [19] N. Gopalswamy, S. Yashiro, G. Michalek, G. Stenborg, A. Vourlidas, S. Freeland, and R. Howard. *Earth Moon and Planets*, 104:295–313, 2009.
- [20] R. A. Harrison, P. W. Waggett, R. D. Bentley, K. J. H. Phillips, M. Bruner, M. Dryer, and G. M. Simnett. *Solar Phys.*, 97:387–400, 1985.
- [21] B. W. Hindman, D. A. Haber, and J. Toomre. *ApJ*, 653:725–732, 2006.
- [22] K. Hori and J. L. Culhane. *Astron. Astrophys.*, 382:666–677, 2002.
- [23] L. L. House, W. J. Wagner, E. Hildner, C. Sawyer, and H. U. Schmidt. *ApJ. Lett.*, 244:L117–L121, 1981.
- [24] T. A. Howard, C. E. DeForest, U. G. Schneck, and C. R. Alden. *ApJ*, 834:86, 2017.

- [25] N. Hurlburt. *J. Space Weather SPAC*, 5(27):A39, 2015.
- [26] B. V. Jackson, K. V. Sheridan, G. A. Dulk, and D. J. McLean. *Proceedings of the Astronomical Society of Australia*, 3:241, 1978.
- [27] J. Jing, V. B. Yurchyshyn, G. Yang, Y. Xu, and H. Wang. *ApJ*, 614:1054–1062, 2004.
- [28] S. Kahler, N. Gopalswamy, P. Makela, S. Akiyama, S. Yashiro, H. Xie, and N. Thakur. In *34th ICRC2015*, volume 34, page 48, 2015.
- [29] S. W. Kahler, E. W. Cliver, H. V. Cane, R. E. McGuire, R. G. Stone, and N. R. Sheeley, Jr. *ApJ*, 302:504–510, 1986.
- [30] G. Kilper, H. Gilbert, and D. Alexander. *ApJ*, 704:522–530, 2009.
- [31] J. Krall, J. Chen, R. T. Duffin, R. A. Howard, and B. J. Thompson. *ApJ*, 562:1045–1057, 2001.
- [32] T. A. Kucera and E. Landi. *ApJ*, 645:1525–1536, 2006.
- [33] D. H. Mackay, V. Gaizauskas, and A. R. Yeates. *Solar Phys.*, 248:51–65, 2008.
- [34] R. M. MacQueen, D. G. Sime, and J.-P. Picat. *Solar Phys.*, 83:103–114, 1983.
- [35] S. F. Martin. *Solar Phys.*, 68:217–236, 1980.
- [36] S. F. Martin. *Solar Phys.*, 121:215–238, 1989.
- [37] P. I. McCauley, Y. N. Su, N. Schanche, K. E. Evans, C. Su, S. McKillop, and K. K. Reeves. *Solar Phys.*, 290:1703–1740, 2015.
- [38] R. Miteva, S. W. Samwel, and M. V. Costa-Duarte. *Solar Phys.*, 293: id. 27, 2018.
- [39] Y.-J. Moon, K. S. Cho, Z. Smith, C. D. Fry, M. Dryer, and Y. D. Park. *ApJ*, 615:1011–1020, 2004.
- [40] R. H. Munro, J. T. Gosling, E. Hildner, R. M. MacQueen, A. I. Poland, and C. L. Ross. *Solar Phys.*, 61:201–215, 1979.

- [41] W. D. Pesnell, B. J. Thompson, and P. C. Chamberlin. *Solar Phys.*, 275:3–15, 2012.
- [42] A. A. Pevtsov, O. Panasenco, and S. F. Martin. *Solar Phys.*, 277:185–201, 2012.
- [43] R. Ramesh and G. A. S. Sundaram. *Solar Phys.*, 202:355–361, 2001.
- [44] B. Rompolt. *Advances in Space Research*, 4:357–361, 1984.
- [45] B. Rompolt. *Hvar Observatory Bulletin*, 14:37, 1990.
- [46] B. Schmieder, P. Demoulin, and G. Aulanier. In *39th COSPAR Scientific Assembly*, volume 39, page 1, 2012.
- [47] A. Shanmugaraju, Y.-J. Moon, K.-S. Cho, S. C. Bong, N. Gopalswamy, S. Akiyama, S. Yashiro, S. Umapathy, and B. Vrsnak. *ApJ*, 708(1):450–455, 2009.
- [48] E. Tandberg-Hanssen, editor. volume 199 of *Astrophysics and Space Science Library*, 1995.
- [49] J. Vial and O. Engvold. *Astrophysics and Space Science Library*. 2016.
- [50] B. Vrsnak. In *IAU Colloq. 167: New Perspectives on Solar Prominences*, volume 150, page 302, 1998.
- [51] M. Waldmeier. *Solar Phys.*, 27:143–148, 1972.
- [52] X.-L. Yan, Z.-Q. Qu, and D.-F. Kong. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 414:2803–2811, 2011.